

Article, Published Version

Körner, Burghard

Die Sinkstoffe der Küstengewässer. Ein Überblick über den Stand der Forschung

Die Küste

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100616>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Körner, Burghard (1955): Die Sinkstoffe der Küstengewässer. Ein Überblick über den Stand der Forschung. In: Die Küste 4. Heide, Holstein: Boyens. S. 5-51.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Die Sinkstoffe der Küstengewässer

Ein Überblick über den Stand der Forschung

Von Burghard Körner

| | |
|--|----|
| I. Die Aufgabe | 5 |
| II. Begriffe | 6 |
| III. Unterlagen | 7 |
| IV. Entwicklung und Stand der Sinkstoffforschung in den Binnengewässern | 8 |
| 1. Übersicht über die Beobachtungsergebnisse und Grundlagen | 8 |
| 2. Die Theorie der Sinkstoffführung der Flüsse und Ströme | 11 |
| V. Die Berechnung der Sinkstofffracht von Tideflüssen | 13 |
| VI. Die Sinkstoffe in den Küstengewässern | 14 |
| 1. Flußmündungen in Meere ohne oder mit geringen Gezeiten | 15 |
| 2. Flußmündungen in Meere mit Gezeiten | 15 |
| 3. Der Sinkstoffhaushalt der Wattgebiete | 21 |
| 4. Die Wirkung menschlicher Eingriffe auf den Sinkstoffhaushalt der Tideflüsse und Watten | 24 |
| VII. Die Herkunft der Sinkstoffe | 26 |
| 1. Die Sinkstoffe der Wattgebiete | 26 |
| 2. Die Sinkstoffe der Strommündungen | 26 |
| 3. Andere Sinkstoffquellen | 32 |
| VIII. Schlickfall und Schlickbindung | 32 |
| IX. Die Strandriffe als Bildungen schwebenden Sandes | 35 |
| X. Zusammenfassung und Folgerungen | 41 |
| XI. Anhang: Die Theorie der Sinkstoffführung in Flüssen und Strömen | 43 |
| XII. Schriftenverzeichnis | 46 |

I. Die Aufgabe

Seit der Überflutung des heutigen Nordseebeckens und der westlichen Ostsee zur Zeit des die letzte Eiszeit beendenden Klimawechsels arbeitet das Meer ununterbrochen an der Gestaltung der deutschen Küsten. Die Kräfte des Meeres, Wellen und Strömungen, suchen die Küstenlinien auszugleichen, Landvorsprünge zu beseitigen, Buchten und tote Winkel abzuriegeln oder auszufüllen. Sie werden durch kosmische und atmosphärische Vorgänge verursacht und gelenkt, welche die Strömungen verstärken oder schwächen und in Stürmen die Wirkung der Wellen zu vernichtender Kraft anwachsen lassen.

Die Abwehrkräfte des Landes beruhen auf dem Aufbau, der Festigkeit und dem Zusammenhalt der die Ufer bildenden Bodenarten. Auch sie unterliegen einem klimatisch bedingten, meist an die Jahreszeiten gebundenen Wechsel. Sonnenschein und Regen lockern von der Oberfläche aus das Gefüge, eindringendes Wasser sprengt es gefrierend und wäscht lösbare Stoffe aus. Lebensvorgänge der Tier- und Pflanzenwelt wirken im Küstensaum in der Hauptsache erhaltend und aufbauend mit.

Nur die systematische Forschung kann die unendlich vielfachen Zusammenhänge und Wechselbeziehungen aufklären. In Zusammenarbeit aller an der Küstenforschung beteiligten

wissenschaftlichen Disziplinen ist in den letzten Jahrzehnten viel geleistet worden. Mehr bleibt noch zu tun. Der im Auftrag des „Küstenausschusses Nord- und Ostsee“ im folgenden gegebene Überblick über die Sinkstoffe in den Küstengewässern hat den Zweck, die auf diesem wichtigen Teilgebiet bisher erarbeiteten Kenntnisse im Zusammenhang darzustellen, noch bestehende Wissenslücken aufzuzeigen und Anregungen für ihre Schließung zu geben.

Bei der Festlegung der Grenzen dieses Teilgebiets aus dem großen Komplex der Küstenforschung stellt sich zunächst die Frage: Was sind im Küstengebiet Sinkstoffe? Schon bei der Fließbewegung des Wassers allein gibt es keine etwa nach der Größe des Einzelkorns festzulegende Grenze zwischen Sinkstoff und Geschiebe. Zunehmende Fließgeschwindigkeiten lassen selbst groben Sand und Feinkies vorübergehend zu Sinkstoffen werden, die auf weite Strecken ohne zwischenzeitliche Bodenberührung fortgetragen werden. Im küstennahen Gebiet des Meeres und besonders in der Brandungszone der Wellen treten zur Turbulenz des strömenden Wassers als der die Sinkstoffbewegung einleitenden und erhaltenden Kraft noch die Impulskräfte der Wellenbewegung hinzu. Diese erreichen in Brechern solche Größe, daß selbst faustgroße Steine aus dem sie tragenden Element heraus und weit durch die Luft geschleudert werden.

Natürlich wird man solche Einzelercheinungen nicht zum Maßstab einer Grenzziehung machen dürfen. Mangels sicherer Beobachtungsunterlagen bleibt jeder derartige Versuch willkürlich. Da aber ein Seegang mittlerer Stärke den Seesand dauernd soweit anzuheben vermag, daß er von der küstenparallelen Strömung ununterbrochen fortgetragen werden kann, scheint es berechtigt, diesen in den Rahmen der gestellten Aufgabe insoweit einzubeziehen, als die Bildung bestimmter Formen der Brandungszone nur durch den unmittelbaren Ausfall des Sandes aus dem Schweben erklärt werden kann.

Auf der anderen Seite sind die von den Flüssen dem Meere in echter oder kolloider Lösung zugeführten Stoffe insoweit zu berücksichtigen, als sie bei der Mischung mit Salzwasser in den Fluß- und Strommündungen ausflocken und Sinkstoffcharakter annehmen.

Die Herkunft eines großen Teils der Sinkstoffe der Küstengewässer aus dem Binnenland läßt es schließlich zweckmäßig erscheinen, der Darstellung einen kurzen Überblick über den Stand unserer Kenntnis der Sinkstoffbewegung in den Festlandgewässern vorzuschicken. Diese ist praktisch und theoretisch schon weit besser erforscht als die der Küstengewässer und kann Hinweise und Unterlagen für die weitere Arbeit liefern.

Nicht einbezogen werden dagegen die Einflüsse der für die Vergangenheit nachgewiesenen und noch gegenwärtig wirkenden Niveauverschiebungen zwischen Land und Meer, die bei einer relativen Hebung des mittleren Meeresspiegels die zerstörenden Kräfte ebenso fördern, wie sie diese bei einer relativen Senkung mindern. Diese Niveauverschiebungen und ihre Ursachen festzustellen ist eine vordringliche Aufgabe aller an der Meeres- und Küstenforschung beteiligten Wissenschaftszweige. Denn die Sturmflut vom 1. 2. 1953 an der niederländischen Südwestküste hat gezeigt, daß auch ein sehr langsames Ansteigen der Wasserstände in den Weltmeeren die Ingenieurbauten an der Küste und besonders die Höhe und Abmessungen der Deiche beeinflußt.

II. Begriffe

Die Zuordnung des wellenbewegten, schwebend beförderten Sandes zu den Sinkstoffen in dieser Arbeit ist mit durch die schwierige und für das Küstengebiet noch nicht zu völliger Klarheit gelangte Begriffsbestimmung veranlaßt.

Die englischsprachige Literatur verwendet für die Gesamtheit der vom Wasser beförderten Stoffe den Begriff „sediment“. Dieser trifft — wie im Deutschen — den irgendwie und -wo erreichten Endzustand und ist nicht geeignet, ohne besondere Zusätze die vorher durchlaufenen Bewegungszustände zu kennzeichnen. Die DIN 4049 vom 1. 3. 1954 bezeichnet die Gesamt-

heit der mechanischen Beimengungen des oberirdischen Wassers deshalb mit Recht als „Feststoffe“ und unterteilt diese in Schwimm-, Schweb-, Sinkstoffe und Geschiebe.

Die Begriffsbestimmungen der DIN für die Schwimmstoffe und das Geschiebe sind klar und eindeutig. Dagegen nicht der Begriff 4.35 „Schwebstoffe“. Offenbar ist versucht worden, die Schweb- und Sinkstoffe nach der Bewegungsform zu unterscheiden. Darauf deutet die Begriffsbestimmung 4.36 „Sinkstoffe“ = „Feststoffe, die vor dem Absinken geschwebt haben“. Wenn diese Unterscheidung beabsichtigt war, so hätten die Schwebstoffe aber nicht als „Feststoffe, meist mineralischer Natur, die im Wasser schweben, weil sie mit ihm im Gleichgewicht stehen“ charakterisiert werden dürfen, denn ihre meist mineralische Natur, das heißt in der Mehrzahl der Fälle: schwerer als Wasser, verlangt ein dynamisches Gleichgewicht zur Aufrechterhaltung des Schwebzustandes, wenn der Begriff Schwebstoff auch für Teilchengrößen oberhalb derer der kolloiden Lösungen gelten soll. Es ist zu hoffen, daß der noch nicht erschienene Teil II der DIN 4049, der die Fachausdrücke und Begriffsbestimmungen der Gewässerkunde qualitativ festlegen soll, durch Angabe der Korngrößengrenzen hierüber Klarheit bringen wird.

Die von der Arbeitsgruppe „Wasserbauliche Hydrometrie“ dem Küstenausschuß Nord- und Ostsee 1951 für seine Zwecke vorgeschlagenen Fachausdrücke sind bestimmter, ohne aber schon als endgültig formuliert gelten zu können. In dieser noch nicht veröffentlichten Definition der Sink- und Schwebstoffe wird unter „Sinkstoff“ ein Material verstanden, „das sich längere Zeit schwebend im Wasser hält, das sich aber bei abnehmender Strömungsgeschwindigkeit oder Wasserruhe wieder absetzt“. Dagegen sind „Schwebstoffe“: „feste Stoffe, die wegen ihrer geringen Korngröße (weniger als $1\ \mu$) infolge der Brownschen Molekularbewegung dauernd schwebefähig sind und daher am Absetzen verhindert werden. In diesem Sinne sind die Schwebstoffe das Übergangsglied zu den gelösten Sinkstoffen.“ Damit umfassen die Schwebstoffe den Korngrößensbereich der kolloiden Lösungen, der in der Kolloidchemie dem Teilchengrößensbereich von $0,2$ bis $0,001\ \mu$ entspricht, und die feineren Fraktionen der „Aufschwemmungen“. Diese haben zwar noch eine vom spezifischen Gewicht, der Kornform und dem Dispersionsmittel abhängige, aber in der Wasserbaupraxis zu vernachlässigende Fallgeschwindigkeit, zum Beispiel für Quarz von Kugelform und $1\ \mu$ Durchmesser in destilliertem Wasser von 15°C : $v = \text{rund } 0,000785\ \text{mm/s}$.

Die gewählte Begriffsbestimmung der Sinkstoffe schließt alle Bewegungszustände: Schweben, Absinken und Ruhe (Ablagerung) ein und gibt keinen Korngrößensbereich an, weil ein großer Teil dieser Stoffe geringes spezifisches Gewicht und die Struktur unregelmäßiger, stark wasserhaltiger Flocken besitzt. Für Sand ist die untere Korngrößengrenze in der Definition der Schwebstoffe auf $1\ \mu$ festgelegt. Die obere entspricht nach allgemeiner Auffassung an der Küste der Feinsandfraktion ($0,1$ — $0,2\ \text{mm}$), die in Schlickablagerungen häufig enthalten ist.

Alle größeren mineralischen Körperchen bis zu einem Durchmesser von $2\ \text{mm}$ sind nach dem genannten Vorschlag „Sand“, das ist „auf dem Meeresboden wanderndes Material, welches durch die Strömung schiebend, rollend oder hüpfend weiter bewegt wird“.

III. Unterlagen

Im Verhältnis zu der sehr umfangreichen Geschiebeliteratur finden sich im deutschen Schrifttum weit weniger Veröffentlichungen über die Sinkstoffe. Fragen aus dem Grenzgebiet der Sandwanderung im Brandungssaum der Nord- und Ostsee und der mit der Landgewinnung zusammenhängenden Sinkstoffe sind dabei noch am häufigsten behandelt. Die Gründe dafür sind in der überragenden technischen Bedeutung der Geschiebebewegung für den weitgetriebenen Ausbau der heimischen Ströme und größeren Flüsse zu suchen, der gegenüber die Probleme der Sink-

stoffführung zurücktreten. In Ländern anderer klimatischer Verhältnisse und Bodennutzungsformen überwiegt die Bedeutung der Sinkstoffführung die des Geschiebes dagegen bei weitem. Dementsprechend lag das Schwergewicht der Forschung hier bereits seit langer Zeit und zum Teil sogar seit der Erschließung dieser Länder bei den Sinkstoffproblemen.

Den Vereinigten Staaten und den tropischen und subtropischen Ländern des englischen Weltreiches gebührt das Verdienst, am meisten zur Erforschung dieser Probleme beigetragen zu haben. Die als „Sedimentation Bulletin Nr. 2“ im Februar 1950 erschienene „Annotated Bibliography on Sedimentation“ (2) gibt auf rund 350 Druckseiten eine Übersicht über etwa 90 v. H. der wichtigsten in englischer Sprache vor 1950 erschienenen Arbeiten. Diese umfassende und unter dem Gesichtspunkt des Ingenieurs geschaffene Zusammenstellung hat dadurch besonderen Wert, daß zu fast allen Titel- und Verfasserangaben kurze Inhaltsübersichten gegeben werden. Die Zahl der seit 1950 erschienenen Veröffentlichungen, die zunehmend auch Fragen der Küstengewässer behandeln, würde demnächst eine Fortsetzung der Bibliographie rechtfertigen und die Arbeiten damit leichter zugänglich machen.

In jüngerer Zeit hat die Sinkstoffforschung auch in Frankreich an Interesse gewonnen. Davon zeugen Berichte der „Société Hydrotechnique de France“, deren Inhalt GEORGE LABAYE in „La Houille Blanche“ (58) zusammengefaßt hat, und andere mehr.

Im übrigen Ausland mit Ausnahme der Niederlande scheinen die Probleme der Sinkstoffe erst in jüngster Zeit die ihrer Bedeutung zukommende Würdigung in der Forschung zu finden. Das ist um so erstaunlicher, als zum Beispiel der Schlickfall für die amerikanische Ostküste, die englischen Nordsee- und Kanalhäfen und die französischen Strommündungen von gleich großer Bedeutung ist, wie für die deutsche Nordseeküste. Die Bemühungen des Verfassers, durch Briefwechsel mit ausländischen Fachleuten Literaturnachweise zu erhalten, sind deshalb so gut wie erfolglos geblieben.

Die Unterlagen, auf die sich diese Arbeit stützt, sind dem Verfasser, soweit sie Strommündungen und Küstengewässer betreffen, in der Hauptsache vom Küstenausschuß Nord- und Ostsee, der Bundesanstalt für Gewässerkunde und anderen Dienststellen zugänglich gemacht worden. Ihnen und Herrn Dr. habil. WOHLBERG, Forschungsstelle Westküste in Husum, der Fehlendes aus seiner persönlichen Bücherei freundlich zur Verfügung stellte, sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Für die Sinkstoffführung in den Binnengewässern lieferten die unter dem Obertitel: „A Study of Methods used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams“ zusammengefaßten Berichte des U.S. Interdepartmental Committee wertvolle Unterlagen (114). Diese Berichte und die erwähnte Bibliographie fassen die bis 1948 gesammelten umfangreichen nordamerikanischen praktischen und wissenschaftlichen Erfahrungen zusammen und vermitteln einen umfassenden Überblick über den Stand der Forschung auf dem Gebiet der Sinkstoffforschung. Auf die den Heften beigefügten umfangreichen Literaturübersichten muß verwiesen werden. Die für diesen Bericht benutzten Arbeiten sind in der Zusammenstellung am Schluß aufgeführt. Zahlen in Klammern verweisen auf dieses Verzeichnis.

IV. Entwicklung und Stand der Sinkstoffforschung in den Binnengewässern

1. Übersicht über die Beobachtungsergebnisse und Grundlagen

Die Bedeutung des Sinkstoffproblems wurde zuerst in den Ländern erkannt, die aus klimatischen Gründen auf Bewässerungsanlagen zur Erhaltung und Steigerung der Ertragsfähigkeit des Bodens angewiesen sind. Die Versuche, Querschnittsform und -größe sowie Gefälle der

Bewässerungskanäle so zu wählen, daß sie formbeständig bleiben und möglichst geringer Unterhaltungsarbeit bedürfen, bezeichnen die erste und älteste Stufe der wissenschaftlichen Erforschung des Sinkstoffproblems.

Ohne auf die zahlreichen Versuche zur Beantwortung dieser so einfach scheinenden Frage einzugehen, muß gesagt werden, daß brauchbare Lösungen empirisch zwar für Einzelfälle gefunden sind — zum Beispiel von LACEY (58a, 58b) —, daß es aber noch nicht gelungen ist, eine für alle Fälle anwendbare Gleichung zu finden. Bei der Vielfalt der Erscheinungen und ihrer örtlichen und zeitlichen Variationsbreite erscheint es auch unwahrscheinlich, daß eine allgemeingültige Lösung gefunden werden kann, die mehr bieten würde als Näherungswerte.

Das Problem wäre einfach, wenn es sich bei der Sinkstofffracht nur um die im Flußbett selbst aufgearbeiteten Feststoffe handeln würde. Der Grundtendenz der Erhöhung dieses Anteils an der Gesamtfracht mit steigender Wasserführung und Fließgeschwindigkeit überlagert sich aber die klimatisch bedingte Zufuhr von Feinstoffen, meist tonigen Charakters, aus der flächenhaften Abspülung mehr oder weniger großer Teile des Einzugsgebiets bei jedem Regenschlag.

So kann zum Beispiel die starke Überregnung eines kleinen Teils des Einzugsgebiets besonders in Zeiten, in denen die Kulturböden nicht durch eine Vegetation geschützt sind, weit unterhalb im Fluß zu einer Erhöhung der Gesamtsinkstofffracht führen, ohne daß sich die Abflußmenge an dieser Stelle ändert. Die gleiche Ursache verändert auch die erwähnte Grundtendenz derart, daß die Sinkstofffracht des steigenden Astes einer Hochwasserwelle weit größer wird als die bei gleichen Wasserständen des fallenden Astes. Damit entfällt die Möglichkeit, gleicher Wasserführung eine bestimmte Sinkstoffführung zuzuordnen.

Hinzu kommt die in der Regel ungleichmäßige Verteilung der Sinkstoffe über den Flußquerschnitt, sowohl der Breite als auch der Tiefe nach. Zwar nimmt die Sinkstoffkonzentration von der Wasseroberfläche nach unten einigermaßen gesetzmäßig zu, aber über die Breite des Querschnitts findet sich selbst in regelmäßigen, langen geraden Flußstrecken nur selten eine annähernd gleichbleibende Verteilung. Vielfach sind in solchen Strecken zwei Zonen besonderer Sinkstoffanreicherung rechts und links der Achse festgestellt, die durch die allgemeine Wasserbewegung ebenso zu erklären sind, wie die einseitige Zunahme der Konzentration in oder unterhalb von Flußkrümmungen. Schließlich ist bekannt, daß sich das Wasser von Nebenflüssen oft noch viele Kilometer weit an seiner Färbung als einseitige, außerordentlich stabile Dichteströmung feststellen läßt.

Aus Messungen an nur einem oder wenigen Punkten des Querschnitts, und mögen sie noch so häufig wiederholt werden, läßt sich daher nur unter besonders günstigen örtlichen Verhältnissen und bei ihrer Ergänzung und Kontrolle durch den ganzen Querschnitt erfassende Vollmessungen ein einigermaßen zutreffendes Bild der Sinkstoffführung gewinnen. Die sehr zahlreichen Literaturangaben über Sinkstofffrachten müssen daher auf die Art ihrer Gewinnung geprüft werden. Bedauerlicherweise geben die meisten von ihnen nur Zufallswerte wieder, aus denen Schlüsse auf die gesamte Sinkstofffracht eines Abflußjahres nicht gezogen werden können.

In der Erkenntnis dieser Tatsache ist mehrfach versucht worden, die Sinkstofffracht durch Aufmessung der Ablagerungen in natürlichen Seen oder Staubecken (18, 78, 82) zu erfassen, und durch die Bestimmung der Korngrößen entnommener Proben den als Geschiebe oder als Sinkstoff zu wertenden Anteil näherungsweise zu errechnen. Dabei werden die feinsten, weit in den See vertriebenen Teilchen von vornherein nicht erfaßt. Außerdem bleibt sowohl die Bestimmung der Ablagerungszeit, als auch die Zuordnung der Proben zu bestimmten Zeiträumen und Abflußmengen und die Feststellung der Dichte der Ablagerungen unsicher.

Die umfassendsten Angaben, die in der Hauptsache aus derartigen Untersuchungen gefunden sind, hat STEVENS (108) gemacht. OEXLE (79) und VAN RINSUM (94) geben Werte von

bayrischen Flüssen. Einige in Frankreich gewonnene Zahlen nennt LABAYE (58). Alle Angaben dürfen aber selbst dann nur als rohe Näherungswerte angesprochen werden, wenn sie wie nordamerikanische aus laufenden täglichen Messungen stammen, weil die Zone der größten Sinkstoffkonzentration in Sohlennähe durch Messungen nicht erfaßbar ist und nur auf Grund einer Extrapolation der Kurven der Sinkstoffverteilung in der Lotrechten geschätzt werden kann.

Es würde hier zu weit führen, aus der Fülle der Unterlagen auch nur einen Auszug zu geben. Doch mag es von Interesse sein, an Hand einiger Zahlen auf weitere Faktoren hinzuweisen, welche die Sinkstoffführung der Flüsse mitbestimmen.

Der Einfluß von Nebenflüssen kommt zum Beispiel in den aus zwölfjährigen Messungen an drei Stellen der Donau ermittelten Werten zum Ausdruck, die ERTL (18) als spezifische Schwebstoffmengen (in ‰ der Jahresabflußmenge) angibt:

| | | |
|------------|------------------------|---------|
| Neu Ulm | 7 611 km ² | 0,056 ‰ |
| Ingolstadt | 20 017 km ² | 0,079 ‰ |
| Vilshofen | 47 674 km ² | 0,040 ‰ |

Die Zahlen lassen Schlüsse auf die Sinkstofffracht der Nebenflüsse zu, die meist weit größer ist und im Inn bei Neu-Oetting 0,203 ‰ erreicht. Dem entspricht eine mittlere Jahresmenge von 3,2 Mill. t oder etwa 2,5 bis 3 Mill. m³, in der die in der sinkstoffreichsten Zone bis 50 cm über der Sohle geförderten Mengen noch nicht enthalten sind, weil das verwendete Auffanggerät nicht tiefer abgesenkt werden konnte.

Die klimatischen und geologisch-mineralogischen Einflüsse auf die Sinkstofffracht mögen schließlich folgende Werte spezifischer Sinkstoffmengen (in ‰ der Jahresabflußmenge) zeigen:

| | | |
|---|--------|----------------------------|
| Mississippi bei St. Louis | 0,7 ‰ | } langjährige Mittelwerte |
| Missouri „ „ | 3,5 ‰ | |
| Mississippi unterhalb des Zusammenflusses | 1,0 ‰ | |
| Colorado, Oberlauf | 13,4 ‰ | } größte Jahresmittelwerte |
| „ Mittellauf | 12,4 ‰ | |
| „ Unterlauf | 9,4 ‰ | |
| Nil bei Assuan | 0,83 ‰ | 14jähriges Mittel |
| Indus bei Sukkur | 3,03 ‰ | } langjährige Mittelwerte |
| Yangtse | 0,36 ‰ | |
| Hoang Ho | 39,5 ‰ | Mittel 1919 |

Kurzfristig auftretende Sinkstoffgehalte ostasiatischer Flüsse erreichen oft 30 v. H. und in Einzelfällen bis zu 50 v. H. des Wassergewichts (20). Die außergewöhnliche Feinheit der Sinkstoffe wird durch folgende Korngrößenangabe gekennzeichnet:

$$\begin{aligned} 0,125 - 0,0625 \text{ mm} &= 2 \% \\ 0,0625 - 0,0039 \text{ mm} &= 48 \% \\ 0,0039 - 0,0001 \text{ mm} &= \text{rund } 50 \% \text{ (Klei).} \end{aligned}$$

Ohne auf die Bedeutung solch hoher Werte für den Ingenieur und die Volkswirtschaft näher einzugehen, sei noch mitgeteilt, daß der mittlere jährliche Flächenabtrag der in der Hauptsache durch das Stromsystem des Mississippi entwässerten Vereinigten Staaten zwar nur auf 0,033 mm geschätzt wird. Dem entspricht aber ein Abtrag an fester Masse von rund 780 Mill. t im Jahr, die sich im Mittel der Jahre 1936—1950 auf rund 500 Mill. t Feststoffe — zum weitaus größten Teil Sinkstoffe — und auf 280 Mill. t in Lösung gegangene Stoffe verteilen (34). Diese

werden zum kleineren Teil in Stauräumen und den Überschwemmungsgebieten abgelagert, zum größeren Teil aber dem Meere zugeführt.

2. Die Theorie der Sinkstoffführung der Flüsse und Ströme

Die auffällige Tatsache, daß kleine Teilchen von größerem Gewicht als Wasser zeitweilig oder dauernd mechanisch in einem Schwebezustand gehalten werden, setzt irgendwelche Kraftwirkungen voraus, die für die Erhaltung des Schwebezustands gleich der Wirkung der Schwerkraft, für die Einleitung des Schwebens aber größer als diese sein müssen. Die Ursachen dieser Kraftwirkungen sahen ältere Forscher entweder in den Unterschieden der Fließgeschwindigkeiten eines Flußquerschnitts oder in „vertikalen Komponenten“, welche sie der Strömung zuordnen.

Die erste Forschergruppe ging von der Beobachtung aus, daß die Fließgeschwindigkeit mit zunehmender Entfernung von der Sohle des Querschnitts nach oben erst schnell, dann langsamer wächst, während die Sinkstoffkonzentration nach oben abnimmt. Es lag nahe, diese Abnahme mit dem kleiner werdenden Geschwindigkeitsgradienten in Verbindung zu bringen. Dabei wurde aber übersehen, daß es sich offenbar um Gleichzeitigkeiterscheinungen und nicht um Ursache und Wirkung handelt. Auf dieser Grundlage unter anderen von FLAMANT aufgestellte Beziehungen konnten deshalb brauchbare Ergebnisse nicht liefern.

Die zweite Gruppe geht von der bekannten Erscheinung aus, daß feste Körperchen um so leichter und zahlreicher in den Schwebezustand versetzt und in ihm gehalten werden, je größer die Geschwindigkeit der Strömung ist. Aus dieser Tatsache, die in der Beobachtung scheinbar aufquellender Wasserkörper im fließenden Wasser eine Stütze findet, schließen sie, daß die Fließbewegung von der Geschwindigkeit v eine aufwärts gerichtete Komponente $v_f = v/m$ besitze, wobei m ein von v abhängiger Beiwert ist, der aber auch zur Wassertiefe in Beziehung gesetzt wird. v_f muß gleich oder größer als die Fallgeschwindigkeit der Körperchen im Wasser sein, um den Schwebezustand zu erhalten oder einzuleiten.

Zu dem gleichen Schluß führt auch die Annahme, daß die bekannten Pulsationen des fließenden Wassers nicht nur in der Strömungsrichtung auftreten, sondern auch in allen Richtungen senkrecht oder schräg zu dieser. Für die Pulsationen selbst findet sich dabei aber, außer bei Bettunregelmäßigkeiten und in oder unterhalb von Krümmungen, keine befriedigende Erklärung. Der Hauptvertreter dieser Gruppe VELIKANOV (120) glaubt auf Grund von Versuchen eine Beziehung zwischen der Sinkstoffverteilung im Querschnitt einerseits und der Fallgeschwindigkeit, dem Abstand von der Sohle und der Zeit andererseits gefunden zu haben.

Diese und ähnliche, empirisch gewonnenen Ableitungen ermöglichen zwar Teilberechnungen, zum Beispiel die der Geschwindigkeiten, welche das Ausfallen von Teilchen bestimmter Größe eben noch verhindern, ihre Autoren waren aber noch nicht in der Lage, die Turbulenz des Wassers rechnerisch in ihre Betrachtungen einzubeziehen. Die gewonnenen Ergebnisse sind gleichwohl, wie zum Beispiel die Arbeiten von KREY (53), als wertvolle Vorarbeiten anzusehen.

Denn der Grundgedanke KREYS, die Geschwindigkeitsverteilung der turbulenten Strömung, die Pulsationen und die Sinkstoffkonzentration miteinander zu verbinden, war richtig. Zur Zeit seiner Arbeiten waren die Voraussetzungen für vollkommenere Rechnungsansätze aber noch nicht gegeben. Diese boten erst die Fortschritte der von PRANDTL eingeleiteten Turbulenzforschung.

Die ersten Ansätze zu deren Verwendung finden sich in den Vereinigten Staaten bei O'BRIEN (77). Sie wurden durch zahlreiche Beobachtungen und Messungen in Strömen und Kanälen sowie durch Versuche mit künstlich erzeugter Turbulenz (42, 95) berichtigt und ergänzt. LANE und KALINSKE (59) und EINSTEIN (17a) gelang es dann, die gewonnenen Beziehungen in eine mathematische Form zu kleiden, die erlaubt, die Sinkstoffverteilung in einer

Stromlotrechten unter gewissen Vereinfachungen und Voraussetzungen zu berechnen, wenn die Sinkstoffkonzentration an einem Punkte dieser Lotrechten gemessen ist.

Die Vereinfachungen sind: die Fortlassung der untersten Zone über der Stromsohle, in der sich die bisher auf keine Weise rechnerisch oder meßtechnisch erfaßbare Sprungbewegung vollzieht; Betrachtung des Abflusses als zweidimensional, so daß eine Stromvertikale einen Wasserkörper von der Breite 1 repräsentiert.

Die Voraussetzungen: Feststellung der Sinkstoffkonzentration an einem Punkt der Vertikalen durch Messung; beharrender Abfluß, das heißt Gleichheit der Geschwindigkeitsverteilung in aufeinanderfolgenden Querschnitten; einheitliche Korngröße der Sinkstoffe; Gleichgewicht zwischen der Wirkung der Schwerkraft, welche die Partikelchen auszufällen und die Konzentration der oberen zugunsten der unteren Schichten zu vermindern sucht, und der Wirkung der Turbulenz, welche die Konzentration ausgleicht.

Die noch keinesfalls vollkommene Theorie beruht auf der durch zahlreiche Messungen bestätigten Annahme, daß die Sinkstoffe gleicher Korngröße oder Fallgeschwindigkeit in der Lotrechten gesetzmäßig — entsprechend der Turbulenz — verteilt sind und daß für die Kurve der Geschwindigkeitsverteilung in der gleichen Lotrechten bestimmte theoretische oder auf Messungen beruhende Annahmen gemacht werden können. Die Sinkstofffracht jedes durch eine Lotrechte repräsentierten Querschnittsabschnitts wird dann durch punktweise Multiplikation der aus den lotrechten Flächen beider Größen rechnerisch oder graphisch festgestellten Mittelwerte gewonnen.

Dabei ist allerdings zu beachten, daß die Kurve der Sinkstoffkonzentration jeweils nur für eine Korngröße gilt. Die Rechnungen müssen also für jede repräsentative Korngröße der gesamten Sinkstofffracht besonders durchgeführt werden. Durch die Benutzung nomographischer Auftragungen kann diese Arbeit wesentlich vereinfacht werden. Gleichwohl bleibt sie um so größer, je weiter der Korngrößenbereich der vom Flusse geförderten Sinkstoffe ist und in je zahlreichere Stufen er zerlegt wird.

Die Arbeits- und Kostenersparnis liegt in der Hauptsache in der erheblich geringeren Feldarbeit, weil für eine vollständige Erfassung der Sinkstofffracht nur je eine Messung in jeder der ausgewählten Meßlotrechten auszuführen ist. Besonders bei großen Flußquerschnitten ergibt sich durch die Zeitersparnis eine Genauigkeit der Ergebnisse, die der einer Vollmessung durchaus gleichwertig ist. Denn die häufigen schnellen Änderungen der Sinkstoffkonzentration selbst bei gleichbleibender Abflußmenge machen das Ergebnis einer Vollmessung um so unsicherer, je längere Zeit sie beansprucht.

Ogleich gegen die hier nur skizzierte Theorie erhebliche Einwände zu erheben und erhoben worden sind, scheint sie doch interessant genug, um sie im Anhang ausführlicher wiederzugeben, zumal eine Veröffentlichung in Deutschland noch nicht bekanntgeworden ist. Die erhobenen Einwände werden dabei mitbehandelt. Die Theorie hat sich in den Vereinigten Staaten besonders für die laufende Überwachung der Schwebstoffführung vollkommen durchgesetzt. Dort wird an gut gewählten Meßstellen meist nur an einem Punkt des Gesamtquerschnitts gemessen, nachdem die allgemeine Konzentrationsverteilung, auch über die Breite, durch wenige über das Jahr verteilte Vollmessungen festgestellt worden ist.

Die gegen die Theorie mit Recht zu erhebenden Einwände werfen jedoch die Frage auf, ob es der sehr zeitraubenden rechnerischen Weiterbehandlung der aus Einzelmessungen gewonnenen Ergebnisse überhaupt bedarf, um zu einer ausreichend zuverlässigen Bestimmung der gesamten Sinkstofffracht eines Flusses zu kommen. Da die Bayrische Landesstelle für Gewässerkunde, französische und italienische Dienststellen für die laufende Überwachung der Sinkstoffführung Einzelmessungen an durch Vollmessungen als für den Gesamtquerschnitt reprä-

sentativ bestimmten Punkten verwenden, würde ein Vergleich der so empirisch gewonnenen mit den sich aus der Theorie ergebenden Sinkstofffrachten leicht möglich und wertvoll sein.

V. Die Berechnung der Sinkstofffracht von Tideflüssen

Zur Berechnung fehlen in der Regel die Voraussetzungen der festen Bettbegrenzung und des gleichförmigen Abflusses. Infolge der Gewichtsunterschiede des Süß- und Salzwassers treten außerdem Strömungsüberschneidungen auf. Das schwerere Seewasser strömt beim Kentern von Ebbe auf Flut als Unterströmung schon ein, während das leichtere Süß- oder weniger salzhaltige Brackwasser an der Oberfläche ausströmt. Die im seeseitigen Teil der Strom- und Flußmündungen scharfe Grenze (Sprungschicht) dieser Strömungen verliert sich aber weiter stromauf durch Diffusion und Mischung.

Schließlich dienen in durch Bänke und Wattflächen geteilten Mündungstrichtern einzelne Stromrinnen bevorzugt dem einlaufenden Flutstrom, andere dem auslaufenden Ebbstrom. Damit entstehen im Längsschnitt und im Grundriß der Mündungen in Verbindung mit dem Wechsel des Tidehubs und der Zuflüsse aus dem Binnenlande sich ständig ändernde und schwer zu übersehende Abflußverhältnisse.

Gleichwohl müßte es möglich sein, durch intensive Messungsarbeit wenigstens für mittlere und Schönwetterlagen Mittelwerte der Strömungs- und Geschwindigkeitsverteilung für einzelne Abschnitte einer gemittelten Tide zu gewinnen und darauf einen Rechnungsansatz nach der entsprechend erweiterten Theorie aufzubauen. Auch wäre es reizvoll, den Einfluß der durch Wellen erzeugten zusätzlichen Turbulenz auf die Sinkstoffverteilung in der Lotrechten grundsätzlich festzustellen¹⁾.

VICK (122) hat einen anderen Weg angegeben, auf dem die Sinkstofffracht von Tideflüssen unter bestimmten Voraussetzungen aus wenigen oder sogar nur einer Punktmessung in jeder Meßlotrechten rechnerisch angenähert bestimmt werden kann.

Die Voraussetzungen sind: beiderseitige Bettbegrenzung bei allen Wasserständen, keine Änderungen der Querschnitte mit der Zeit durch Ablagerung oder Abtragung und einmalige Erfassung der Sinkstofffracht bei Flut- und Ebbstrom durch Vollmessungen bei möglichst zahlreichen Querschnittsfüllungen und mitzumessenden Fließgeschwindigkeiten. Ziel dieser Voruntersuchung ist die Feststellung des Punktes in jeder Meßlotrechten, der die mittlere Sinkstoffkonzentration in dieser Lotrechten repräsentiert. VICK nimmt an, daß dieser Punkt im allgemeinen in 0,3 bis 0,4 t der Wassertiefe t über der Sohle liegt, aber seine Lage infolge der durch verschiedenen Salzgehalt veranlaßten Strömungsschichtung bei Ebbe und bei Flut und auch in den einzelnen Meßlotrechten wechselt.

Zwischen dem Sinkstoffgehalt s (kg/m^3) und der Fließgeschwindigkeit v (m/s) soll die Beziehung bestehen:

$$s = k \cdot v^2,$$

¹⁾ Während der Drucklegung teilt Herr Dr. Ir. VAN VEEN, Hoofdingenieur-Directeur, Rijkswaterstaat — Allgemeine Dienst, freundlicherweise mit, daß es Herren seiner Verwaltung gelungen ist, mit Hilfe der Theorie auch im Tidegebiet quantitative Sinkstoffberechnungen durchzuführen, wenn die Salzgehaltsunterschiede nicht zu groß sind. Die Berechnungen stimmen mit den Ergebnissen von Messungen und Peilungen überein. Der Wind hat wenig Einfluß, wenn die Wassertiefen nicht zu klein sind. Leider sind die entwickelten Berechnungsmethoden noch nicht veröffentlicht.

Dr. VAN VEEN verweist außerdem auf die im Juni 1955 erschienene Arbeit von H. A. EINSTEIN: „Mechanics of bottom sediment movement, due to Wave-action.“ Technical Memorandum no. 75 of the Beach Erosion Board. Diese konnte nicht mehr beschafft und berücksichtigt werden. Herrn Dr. Ir. VAN VEEN sei für seine freundliche Mitteilung an dieser Stelle bestens gedankt.

deren Unbekannte k und z empirisch zu bestimmen sind. Für den durch die Meßlotrechte repräsentierten Querschnittsteil wird dann

$$s_m = k \cdot v_m^z.$$

Für den Gesamtquerschnitt ist die mittlere Profilvergeschwindigkeit

$$V_m = \frac{\int_0^B v_m \cdot dx}{B}$$

und die durch den Querschnitt geförderte Sinkstoffmenge wird:

$$S_m = \frac{\int_0^B s_m \cdot dx}{B} = \frac{\int_0^B k v_m^z \cdot dx}{B}.$$

Die Gleichung ist jedoch nur lösbar, wenn die Fließgeschwindigkeiten gesetzmäßig über die Querschnittsbreite verteilt sind. Der Verfasser gibt z. B. für von der Strommitte nach beiden Seiten parabelförmig auf Null abfallende v_m -Werte nach einigen Umrechnungen folgende Gleichung an:

$$S_m = \frac{k}{B} \left(\frac{6 V_m}{B^2} \right)^z \cdot \int_0^B (x \cdot B - x^2)^z \cdot dx.$$

Das Integral ist am einfachsten graphisch auszuwerten, da z in der Regel einen Dezimalbruch darstellt.

Der Verfasser sagt abschließend, daß das Verfahren wegen der notwendigen Verallgemeinerungen nur überschlägliche Resultate erwarten läßt. Ob dieses Ergebnis aber auch für die Strecke eines Tideflusses gilt, in dem Überschiebungen des Flut- und Ebbstroms eintreten, bleibt offen.

In der gleichen Arbeit wird ein Näherungsverfahren behandelt, mit dem die in einer bestimmten Flußstrecke während einer Tide oder eines Tideabschnitts abgelagerten oder ausgeräumten Sinkstoffmengen ermittelt werden können. Und schließlich wird dieses Verfahren mit dem Ziel abgewandelt, den Wechsel zwischen den in dem obersten Abschnitt eines Tideflusses ein- oder ausgetriebenen Schwerstoffmengen aus den im gleichen Zeitabschnitt am untern Ende dieser Strecke beobachteten Tiden ungefähr zu schätzen. Die Gleichungen und die ihre Verwendung einschränkenden, vom Verfasser erläuterten Voraussetzungen anzugeben, würde hier zu weit führen.

In den Wattgebieten und an der freien Küste besteht auch unter Zuhilfenahme empirischer Messungen vorläufig keine Möglichkeit zur Berechnung der Sinkstoffführung. Bei den Wattströmen und Prielen fehlen bei höheren Wasserständen die seitlichen Begrenzungen. Die Überströmung der Watten und der Wiederablauf des Wassers von ihnen bringt sprungartige Änderungen der Sinkstoffführung. Hier und im Brandungsraum der Küsten verstärkt der Wellenschlag die Aufnahme und den Transport der Sinkstoffe um so mehr, je höher die Wellen und je geringer die Wassertiefen werden.

Für die äußeren Teile der Mündungsgebiete von Tideflüssen hat LUCHT (62, 64) jedoch ein empirisches Verfahren angegeben, mit dem zwar nicht der gerichtete Schwerstofftransport, aber die gesamte Materialumlagerung in einem abgegrenzten Gebiet durch den Vergleich aufeinander folgender Peilpläne überschläglich ermittelt werden kann. Hierüber wird weiter unten im Abschnitt VI 2 berichtet.

Da bekannt ist, daß die Länge der durch Wellen erzeugten symmetrischen Riffel von der Wellenhöhe, der Wassertiefe und der Korngröße des Sandes abhängt, wird es sich empfehlen, in Fortsetzung der bisher vorliegenden Versuche die Grenzwerte der Orbitalgeschwindigkeiten festzustellen, die ein Material bestimmter Korngröße in Suspension bringen. Das erfordert zunächst die versuchstechnisch schwierige Erfassung dieser Geschwindigkeiten bei Flachwasserwellen im Laboratorium.

VI. Die Sinkstoffe in den Küstengewässern

Die vielfältigen Formen der Sinkstoffbewegung und -ablagerung in den Küstengewässern verlangen eine Gliederung des Stoffes nach dem Ort der Erscheinungen.

1. Flußmündungen in Meere ohne oder mit geringen Gezeiten

Sie verdanken ihre Entstehung den vom Fluß zugeführten und mit Verringerung der Fließgeschwindigkeit in den größer werdenden Querschnitten zur Ablagerung kommenden Feststoffen. In den größeren Flüssen und Strömen überwiegt dabei der Anteil der Sinkstoffe den des am Grunde bewegten und als Geschiebe anzusprechenden Sandes erheblich. Für den Mississippi ist zum Beispiel ein Verhältnis von 85 : 15 festgestellt.

Die Sinkstoffe fallen um so weiter seewärts aus, je feiner sie sind. Über diese Ablagerungen schiebt sich im Laufe der Zeit und besonders bei Hochwasserführung des Flusses gröberes Material hinweg. Ihm überlagert sich in ruhigen Zeiten wieder feineres. Der entstehende Schüttkegel ist also schichtweise aufgebaut, wenn nicht größere Spiegelschwankungen die Ablagerungen in den Einflußbereich der Wellen bringen. Diese arbeiten die Ablagerungen auf, verschieben sie landwärts und lassen sie häufig über das mittlere Meeresniveau in kürzeren Zeiträumen aufwachsen, als bei den vergleichbaren Bildungen an den Flußmündungen in Binnenseen.

Der Fluß bahnt sich durch die Aufschüttung einen oder mehrere Wege. Die ursprünglich vorhandenen Küstenformen, vorherrschende Küstenströme, langfristige relative Änderungen des mittleren Meeresniveaus zum Festland und das Abflußregime des Flusses wirken an der Bildung der Mündungen — einfache, Delta- oder Haffmündungen — mit, soweit der Mensch nicht im Interesse der Schifffahrt und Vorflut durch technische Maßnahmen in die natürliche Entwicklung eingreift.

Nur die feinsten Sinkstoffe kommen — besonders bei unruhigem Wetter und Hochwasserführung der Ströme — infolge der durch die Wellen erzeugten Turbulenz in Küstennähe nicht zur Ablagerung, sondern werden weit in das Meer hinausgeführt. So ist das „graue Wasser“ der Weichsel wiederholt noch auf der Höhe von Brüsterort und nördlich davon festgestellt worden, ohne daß die das Wasser färbenden Sinkstoffe in diesem Gebiet schon endgültig zur Ablagerung kommen. Das ist, wie PRATJE (87, 90, 90a) nachgewiesen hat, nur in den im Stromschatten liegenden größten Tiefen des Bodenreliefs und in geschützten Buchten möglich. Hier sammelt sich auch das feinste Material der in Uferabbrüchen aufgearbeiteten diluvialen Mergel und Tone und bildet ausgedehnte Schlickgebiete. RUCK (97) berichtet im einzelnen über die Bodenbedeckung der Lübecker Bucht.

2. Flußmündungen in Meere mit Gezeiten

Flußmündungen in Meere mit Gezeiten unterliegen zusätzlich den gestaltenden Kräften der regelmäßigen Spiegelschwankungen und dem seewärts größer werdenden Einfluß des Salzwassers. Mit dem Tidehub wechselt das Fließgefälle die Richtung. In Abhängigkeit vom Meeresniveau bei HW, den jeweiligen Abflußmengen und dem Spiegelgefälle des Flusses tritt Salzwasser in die Mündung mehr oder weniger weit ein, um bei außen fallenden Wasserständen unter dem Druck des zurückgestauten Süßwassers wieder zurückzupendeln. Durch Mischung und Diffusion treten dabei hin- und herschwingende Brackwassergebiete²⁾ mit landwärts abnehmendem Salzgehalt ebenso auf, wie Überschiebungen der Strömungen in den Grenzgebieten der Brackwasserzone gegen Fluß und Meer als Folge der verschiedenen spezifischen Gewichte und der Gestaltung des Mündungsgebietes im Grundriß und in den Querschnitten.

Die vielfältigen Erscheinungen haben grundsätzliche Bedeutung für die vom Fluß mitgeführten Feststoffe jeder Art. Es galt lange Zeit als selbstverständlich, daß diese restlos bis in die See verfrachtet würden und schließlich irgendwo zur Ablagerung kämen. Besonders niederländische Forscher: BAAK (3), VAN VEEN (116, 117, 118), CROMMELIN und MAASKANT (8, 9) glauben aber durch petrographische Untersuchungen festgestellt zu haben, daß aus Rhein, Ems,

²⁾ Hier ohne Rücksicht auf den Salzgehalt im allgemeinen Sinne gebraucht.

Weser und Elbe kein Flußsand bis ins Meer gelangt. Über ihre und die Forschungsergebnisse anderer Autoren berichtet zusammenfassend GRIPP (26) unter Angabe zahlreicher Literatur. VAN VEEN schließt aus seinen Untersuchungen: „Im allgemeinen ist die obere Grenze des Brackwassergebietes als Grenze des Seesandgebietes anzusehen. Wohin auch nur ein Tropfen Salzwasser kommen kann, dorthin kann auch ein Körnchen Seesand und sicher Seeschlick kommen.“

Dieser Schluß ist zweifellos richtig, besagt aber keineswegs, daß Flußsand nicht weiter seewärts und bis ins Meer gelangt. CROMMELIN und MAASKANT gehen in ihren Folgerungen noch erheblich weiter: „Der von den Flüssen Ems, Weser und Elbe transportierte Sand ist oberhalb der Mündungsgebiete deutlich verschieden von dem in den Mündungsgebieten und Außenrinnen. Hier und im Watt tritt die typische A-Assoziation auf. Mit anderen Worten: es wird kein Flußsand in die See hinausgeschafft, sondern umgekehrt Sand aus der See durch den Flutstrom eine Strecke in die Mündung aufwärts gespült, wie es VAN VEEN schon früher für den Rhein nachgewiesen hat.“ Andererseits weisen die gleichen Forscher aber nach, daß sich im Mündungsgebiet der Ems und im Watt bis zu 5 % metamorphe Mineralien des Mittellaufs finden.

Der VAN VEENSchen Auffassung sind EDELMAN (16, 17) und SCHAANK (99) auf Grund petrologischer Untersuchungen in den Rheinmündungsarmen entgegengetreten. Sie sind der Meinung, daß der aus Deutschland den Rhein herunterkommende Sand in Holland mit Sanden anderer Herkunft gemischt ist. Sie erklären das damit, daß die Flußbetten zum Teil in Niederterrassen aus der Pleistozänzeit eingeschnitten, zum Teil aber auch durch tiefgehende Baggerungen erhebliche Umlagerungen eingetreten sind. Die Aufteilung des Baggergutes in Kies und Sand und das Zurückwerfen großer Sandmengen habe erhebliche Umschichtungen bewirkt, so daß die heutige Zusammensetzung des Sohlenmaterials nicht mehr den natürlichen Verhältnissen entspräche.

Wir danken HENSEN (29) den wissenschaftlichen Nachweis, daß es in der Mündungsstrecke einen „Gleichgewichtspunkt“ der Strömungen gibt, oberhalb dessen die Sandwanderung stromab, unterhalb aber stromauf gerichtet ist. Die Lage dieses kritischen Punktes verschiebt sich mit steigendem Oberwasser stromabwärts, mit fallendem stromaufwärts. Seitlich des Stroms gelegene Watten, die bei Flutstrom länger überströmt werden als bei Ebbstrom, verlagern ihn stromab. Die Brackwassererscheinungen verschieben den Gleichgewichtspunkt für die Geschwindigkeiten an der Sohle stromauf und für die Oberflächengeschwindigkeiten stromab.

HENSEN weist weiter darauf hin, daß die Sandwanderung durch ein Exponentialgesetz an die Strömungsgeschwindigkeiten gebunden ist, das im Tidegebiet wegen der nicht stationären Strömungen aber nicht angewendet werden kann. Die Gleichsetzung des kritischen Punktes der Strömungen mit dem der Sandwanderung bietet deshalb nur eine Näherungslösung. Der natürliche Wechsel der die Lage des Punktes beeinflussenden Faktoren: Oberwasser, Eisgang, jahreszeitlich schwankende Größe des Tidehubs, wechselnde Dichte des Wassers usw. schieben ihn außerdem periodisch und aperiodisch hin und her. Damit wird der kritische Punkt zu einer kritischen Zone, in der regelmäßig von Land und von See her eine Sandanhäufung entsteht. Als Beispiel wird angeführt, daß aus dem Elbeabschnitt zwischen Brunsbüttelkoog und dem Klotzenloch in den drei Jahren von 1928 bis 1930 zwar rund 45 Mill. m³ Sand nach See zu abgetrieben, in den folgenden sechs Jahren aber 75 Mill. m³ wieder eingetrieben sind. Sie können nicht vom Oberlauf stammen, da der Eintrieb von dort im Mittel nur 500 000 m³ im Jahr beträgt.

Für das Mündungsgebiet der Elbe zeichnete LUCHT (62, 63) aus den jährlichen Peilplänen von 1937 bis 1950 Tiefenänderungspläne und stellte durch Planimetrieren der Flächenelemente die Veränderungen des Sandinhalts eines Gebietes von etwa 100 km² Größe zwischen der Kugelbake und dem Feuerschiff „Elbe 2“ fest. Dabei ergab sich, daß Jahren oder Jahresgruppen mit einer überwiegenden Sandförderung elbeauswärts Jahre oder Jahresgruppen mit überwiegendem Sandeintrieb folgen. Insgesamt überwiegt in der Jahresreihe die Sandförderung von See her

mit 2,8 Mill. m³. Die Angabe HENSENS für die Jahre 1928 bis 1936 ist damit qualitativ bestätigt. Die geringere Größe der Sandverfrachtung von der See her mag, wie der Wechsel von Jahren mit überwiegendem Ein- oder Austrieb, durch eine Änderung der wirkenden Kräfte verursacht sein, die in der Hauptsache meteorologische Ursachen haben dürfte. LUCHT betont, daß Aussagen hierüber noch nicht gemacht werden könnten, da die bisher untersuchten zehn Jahre eine zu kurze Zeit seien, „um diese in langen Perioden ablaufenden Vorgänge zu erfassen“. Er vermutet: „Auf längere Sicht scheint sich ein Gleichgewichtszustand herzustellen zwischen den beiden Sandströmen.“

Die vom Flut- und Ebbstrom bewegten Schwerstoffmengen hat LUCHT durch umfangreiche, größtenteils an drei Punkten — an der Oberfläche, in der Mitte der Tiefe und 5 cm über der Sohle — einer Lotrechten während einer ganzen Tide entnommenen und sorgfältig analysierten Schöpfproben ermittelt und zu Bändern derart zusammengefaßt, daß die jeweils in einer Meßlotrechten überwiegende Bewegungsrichtung dem see- oder landwärts gerichteten Band zugeordnet wurde. Die in der Sekunde bewegten Sinkstoffmengen sind dabei durch verschiedene Schraffur gekennzeichnet. Sie bestehen überwiegend aus Sand, dessen gemittelte Korngrößen zwischen 0,21 und 0,26 mm liegen (Abb. 1).

Es ist erklärlich, daß diese Darstellungsart Abweichungen von der einfacheren HENSENS aufweist. Diese können auf die andere Art der Probenentnahmen — früher: Messungen mit der LÜDERSSchen Sandfalle (67, 69), jetzt Schöpfproben mit dem horizontalen Wasserschöpfer nach WOHLBERG (133) —, aber auch auf Strömungsverlagerungen in der Zwischenzeit zurückzuführen sein.

Die Ergebnisse LUCHTS werden durch die mineralogischen Untersuchungen von SIMON in den Jahren 1949/50 (106) im Gebiet von Cuxhaven bis zum Feuerschiff „Elbe 1“ und durch ergänzende Bestandsaufnahmen³⁾ in einem elbeaufwärts und nach Norden erweiterten Gebiet bestätigt, die an gleicher Stelle demnächst veröffentlicht werden sollen.

³⁾ Herrn Dr. SIMON sei für die liebenswürdige persönliche Schilderung seiner neuen Forschungsergebnisse herzlich gedankt.

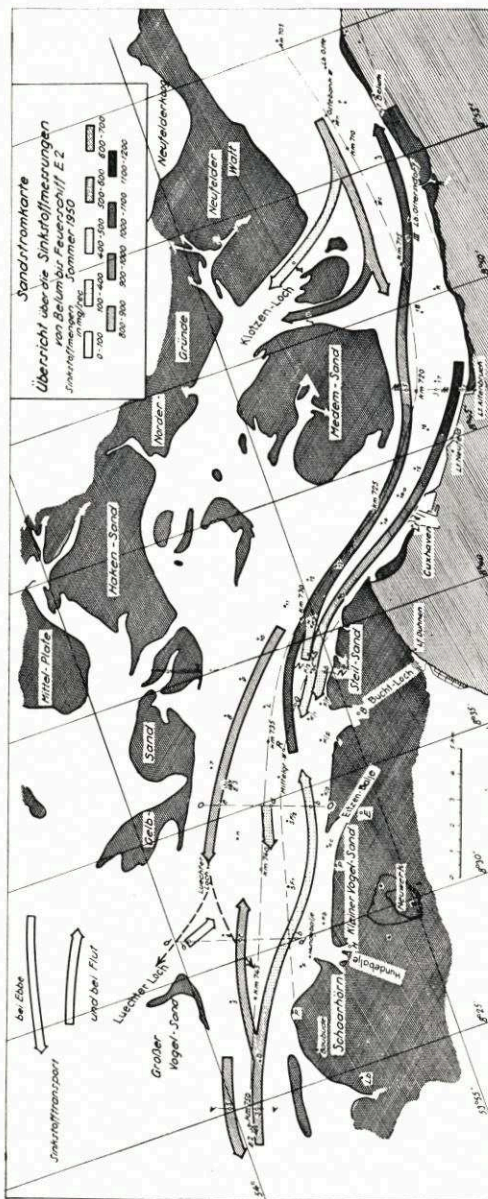


Abb. 1. Sandstrombänder in der Außenelbe [nach LUCHT (62)]

Die auf ganz anderem Wege — im Strom mit dem Bodengreifer nach VAN VEEN und auf den trockenfallenden Watten durch Abschälen der Oberfläche bis zu 1 cm Tiefe, zu festgelegten Tidezeiten — bei Flut und Ebbstrom gewonnenen Proben wurden nach Korngrößen zerlegt und aus der Kornfraktion 0,2 bis 0,1 mm die Schwerminerale ausgesondert. In sehr mühsamer Arbeit wurden sodann die Mineralarten dieser Fraktion unter dem Polarisationsmikroskop bestimmt und die Körner der einzelnen Arten ausgezählt.

Die Hauptkomponenten der schweren Fraktion der Sande in der Außenelbe sind die Mineralien Granat, Epidot und Hornblende, die der A-Gruppe nach EDELMAN und BAAK entsprechen. Augit tritt als Mineral der Flußsande im Seesand ganz zurück. Der Gedanke, das Verhältnis der Zahl der Augitkörner zu der der Epidotkörner in den Proben zur Feststellung der Herkunft der Sande zu benutzen, verspricht guten Erfolg, da beide Mineralien das gleiche spezifische Gewicht von 3,3 haben. Sie sind zwar schwerer als die Masse des Sandes, in der Kornfraktion 0,2 bis 0,1 mm dürften dadurch bei der Größe der wirkenden Kräfte aber keine merkbaren Unterschiede ihrer Beweglichkeit dem Quarzsand gegenüber bestehen.

Voraussetzung für die Anwendung des Verfahrens ist allerdings die Ermittlung des Gehalts der glazialen und postglazialen Sande des Elbelaufs früherer Epochen an den gleichen Schwerminerale. Die von SIMON ausgeführten Untersuchungen zeigen, daß die als Seesand angesprochenen Sande der Außenelbe und die Schmelzwassersande des Elbeurstromtals den gleichen Bereich der Verhältniszahlen Augit/Epidot · 100 aufweisen. Diese beiden Sandarten können also nicht unterschieden werden. Mit Einschränkung gilt das gleiche für die andere Gruppe der postglazialen Elbesande und der rezenten Flußsande.

Die von SIMON entworfene, noch nicht veröffentlichte Auftragung der Mengen der Hauptminerale im Längsschnitt der Außenelbe läßt klar erkennen, wie weit die augitarmeren Sande der ersten Gruppe stromaufwärts vordringen und wie weit der Flußsand seewärts verfrachtet wird. Die Mischzone der Sande verschiedenen Ursprungs tritt dabei deutlich hervor. Zur Unterscheidung der Sandherkunft gibt SIMON an: *„Wo der Augitwert < 10 ist, entspricht die Schwermineralzusammensetzung der reinen A-Gruppe, wo der Augitwert 10 übersteigt, liegt Beimischung von rezenten oder postglazialen Elbsanden vor.“*

Die Eintragung der aus den Proben ermittelten Verhältniszahlen in eine Karte (Abb. 2) in Verbindung mit den gemittelten Korngrößen d_g ergibt durch Umrandung der Gebiete gleicher Größen ein Zustandsbild der Verteilung der Sandarten, das mit den Ergebnissen von LUCHT weitgehend übereinstimmt. Auf die vorliegende und die vorbereitete Veröffentlichung darf hier verwiesen werden. Zur Frage des Vordringens von rezenten Flußsanden in das Außengebiet der Elbe sei der Arbeit aber entnommen, daß der augit-verunreinigte Sand bis zum Westende des Lüchter Grundes vordringt. Hier in 8°30' O trifft er auf einen mit der Flut einlaufenden Strom gleicher Art. Dieser wird aus in 8°20' O angeschnittenen postglazialen Sanden gespeist. Von diesen ausgehend wird der augit-verunreinigte Sand mit dem Ebbstrom auch nach Westen verfrachtet.

Die Karte LUCHTS und die jüngsten Feststellungen SIMONS lassen erkennen, daß der Ebbstrom Flußsande auch durch das Klotzenloch in nördlicher Richtung fördert, wo sie noch auf Teilgebieten der großen Sände nachweisbar sind. Weiter konnte gezeigt werden, daß aus großen Tiefen, besonders aus einem mehr als 30 m tiefen Kolk vor Groden, fluvioglaziale kiesige Sande des Liegenden der jungen Elbesande ausgespült und sowohl stromauf als auch stromab verteilt werden (107). Überhaupt sind die Sandumlagerungen in dem gesamten Gebiet der Außenelbe sehr groß und weit größer als die des durch den Flut- oder Ebbstrom gerichteten Transports (64). Wenn daher auch keine Möglichkeit besteht, den endgültigen Verbleib der Flußsande in der Mischung mit Seesand mit Hilfe der Schwerminerale sicher festzustellen, so spricht doch sehr viel dafür, daß er im Zuge der Umlagerungen bei den heutigen Gezeitenverhältnissen auch aus der Elbe noch bis ins Meer gelangt.

Im Gegensatz zur Elbe besitzen Weser und Jade und wahrscheinlich auch die Ems „die Natur einer Ebbstromrinne“ (29). Nach KRÜGER (54, 55) dringt der von Westen kommende Sand in die Jade selbst nicht ein. Das gleiche wird für die Weser aus der Wanderung der Sandbänke durch die Außenweser und daraus geschlossen, daß die 20 m-Tiefenlinie an beiden Mündungen fast gradlinig vorbeiläuft, während sie in die Elbe tief einbuchtet. Die Mischungszone des Fluß- und Seesands ist deshalb in diesen Mündungsgebieten noch weiter seewärts zu erwarten

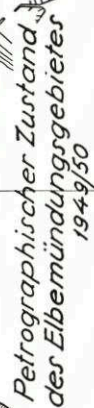


Abb. 2. [aus SIMON (106)]

als in der Elbe. Um so leichter wird der Flußsand im Zuge der auch hier stattfindenden großen Umlagerungen bis in die See gelangen.

Für die feineren, schlickbildenden Sinkstoffe der Tideflußmündungen gilt das gleiche. Die Feststellung ihrer Wanderwege und ihres Verbleibs ist meßtechnisch aber sehr viel schwieriger.

Nach den Messungen LÜNEBURGS (71, 72) gelten für den Sinkstoffgehalt der landwärts gerichteten Unterströmungen auch die Feststellungen HENSENS. In der kritischen Zone reichern sie sich mit Sinkstoffen an. Die salzärmere Oberströmung wird gestaut und über die Watten abgedrängt. Abbildung 3 gibt zwei der Messungen LÜNEBURGS rund 5 km südöstlich des Roter Sand-Leuchtturms bei starker Oberwasserführung der Weser wieder, die ein repräsentatives Bild der vertikalen Verteilung von Salz und Trübung oder Sinkstoffen in der Außenweser z. Z.

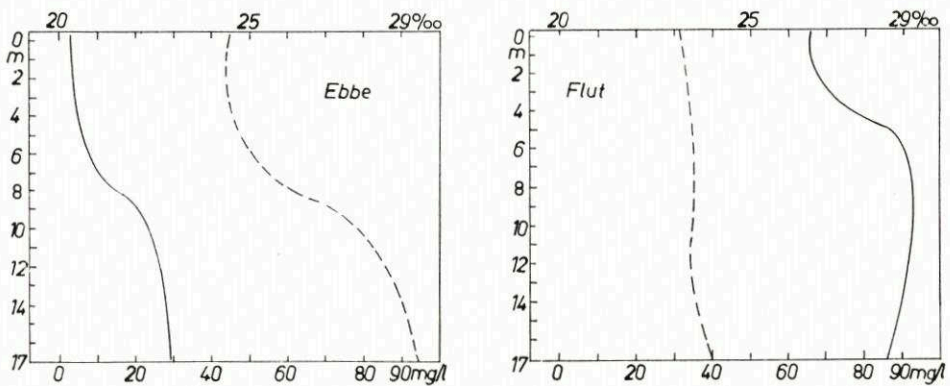


Abb. 3. Verteilung von Salzgehalt (—) und Trübung (....) bei fortgeschrittener Ebbe und Flut in der Unterweser

(Den Druckstock stellte der Verlag Franz Leuwer, Bremen aus Lüneburg freundlich zur Verfügung.)

der fortgeschrittenen Flut und Ebbe bieten. Der Sinkstoffgehalt ist an der Meßstelle im Verhältnis zu den in der oberen Brackwasserzone gemessenen Werten insgesamt sehr klein, aber in dem oberen, seewärts strömenden Wasserkörper noch wesentlich geringer als in Sohlennähe. Gleichwohl wäre der Schluß verfrüht, daß die Sinkstoffe der Unterströmung ausschließlich von See her herangeführt werden, weil es sich dabei auch um Material handeln kann, das weiter seewärts aus der Oberströmung abgesunken ist. LÜNEBURG vermutet ein gelegentliches Vordringen dieser Oberströmung bis zum Roten Sand. PRATJE hat die Trübung aus der Elbe noch südlich Helgoland festgestellt (88, 89).

Nach HENSEN (29) versetzt eine vor der Elbemündung vorhandene Restströmung das aus der Elbe abströmende Oberflächenwasser längs der schleswig-holsteinischen Küste in nördlicher Richtung. Der Einfluß des Elbewassers auf den Salzgehalt reicht noch bis Horns-Riff.

GLANGEAUD (25) berichtet, daß der „Schlammfropfen“ in der Gironde bei HHW des Flusses vollkommen aus der Mündung herausgedrückt und dann von der Küstenströmung fächerförmig verteilt wird. Nach BRAUDEAU (4) scheint für die Loire-Mündung das gleiche zu gelten. Über den Sinkstoffgehalt der ausströmenden Wassermengen finden sich jedoch keine Angaben.

Einem dem Internationalen Schiffahrtskongreß in Rom 1953 von DANIEL (9a) erstatteten Bericht ist zu entnehmen, daß diese mit „Aureole“ bezeichnete Erscheinung auch an anderen französischen Flußmündungen beobachtet wird. Die Stärke der als Oberströmung über einer einlaufenden, durch den Salzgehalt schwereren Grundströmung wird mit 0,5 m angegeben.

Dieses Maß dürfte aber orts- und zeitgebunden sein, denn auf den Einfluß des Windes, des Tidehubs und des Oberwasserzuflusses wird hingewiesen.

PRATJE stellt in der mittleren Nordsee ausgedehnte Schlickgebiete fest (86, 88, 89) (Abb. 4) und vertritt seine Auffassung, daß es sich dabei um junge und jüngste Ablagerungen handelt, mit treffenden Argumenten gegenüber anderen Autoren (66, 103). Dabei werden die Voraussetzungen für die Bildung solcher Ablagerungen leicht beweglicher Sedimente in der Flachsee mit Gezeiten ausführlich geschildert. Über die vermutliche Herkunft der abgelagerten Sinkstoffe finden sich in den Arbeiten aber keine Angaben. Die Besiedlung der küstennäheren Teile südlich und südöstlich Helglands mit Foraminiferen anderer Art als im küstenferneren Bereich der Deutschen Bucht wird auf das salzärmere Wasser zurückgeführt, obgleich sich auch die Sedimente deutlich unterscheiden.

Schließlich begründet LUCHT (64) in seiner jüngsten Arbeit die Auffassung, daß zwischen den von der Elbe der See zugeführten Schwerstoffen und den aus der See stammenden ein „Transportgleichgewicht“ besteht. Eine etwa geringere Sandförderung aus der Elbe wird durch den Sinkstofftransport zur See ausgeglichen.

Über die geförderten Mengen sind außer den weiter oben mitgeteilten Angaben für den Mississippi (34) keine Zahlen bekannt. Um diese zu gewinnen, müßten Sinkstoffmessungen weit seewärts ausgedehnt werden und die Ober- und Unterströmung getrennt erfassen. Aber auch ohne Vorliegen derartiger zeitraubender und kostspieliger Untersuchungen kann nicht bezweifelt werden, daß auch Sinkstoffe aus den Tideströmen bis ins Meer gelangen.

Nach den vorstehend geschilderten Gründen spricht alles dafür, daß der oben mitgeteilte bedingungslose Schluß von CROMMELIN und MAASKANT nicht haltbar ist. Auch bei den heutigen Gezeitenverhältnissen der Nordsee ist mit einem Austausch von Schwerstoffen zwischen den Tideflüssen und dem Meer in den Mündungsgebieten zu rechnen. Die Äußerung VAN VEENS wird nur in diesem Sinne zu verstehen sein. Daß andere hydrographische und morphologische Voraussetzungen diesen Austausch sehr stark zugunsten der einseitigen Sandförderung zum Meere verschieben können und in früheren Epochen der Erdgeschichte verschoben haben, bedarf keines Beweises.

3. Der Sinkstoffhaushalt der Wattgebiete

Für den Sinkstoffhaushalt der Wattgebiete ist der Massenaustausch mit der offenen See im Hinblick auf die Zukunftsaussichten der Landgewinnung von ausschlaggebender Bedeutung. Für die nordfriesischen Watten ist nach bekanntgewordenen Arbeiten bisher zweimal der Versuch

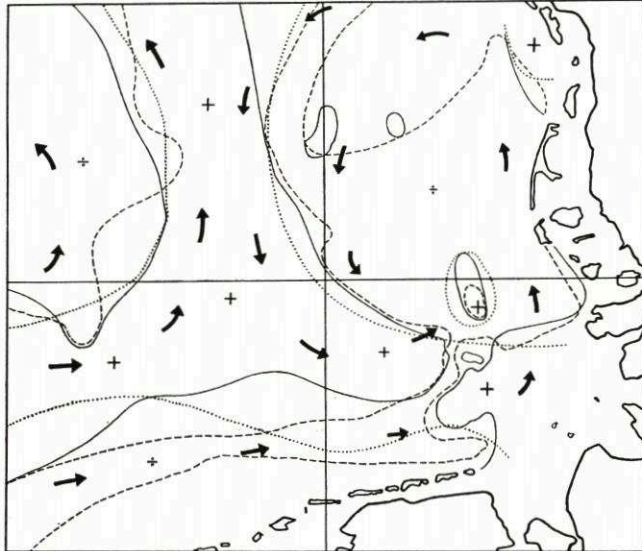


Abb. 4. Restströmungen (→) und Schlickgebiete (+) in der Nordsee
[nach PRATJE (89)]

(Für die Überlassung des Druckstockes sei dem Verlag der Geologischen Rundschau bestens gedankt.)

gemacht worden, festzustellen, ob der in den großen Wattgebieten vor der schleswig-holsteinischen und der dänischen Westküste von den Gezeiten bewegte und an wind- und strömungsgeschützten Stellen meist in unmittelbarer Küstennähe zur Ablagerung kommende Schlick durch Zufuhr aus der offenen See laufend oder periodisch ergänzt wird oder ob er ausschließlich dem Wattenmeer selbst entstammt und sich im Lauf der Zeit erschöpfen kann.

GRY (27) gibt ein sehr anschauliches Bild der Schwerstoffverteilung und -bewegung in dem vom Graadyb gespeisten nördlichsten Teil des nordfriesischen Wattenmeeres, das mit Esbjerg in der Mitte seawärts durch die Halbinsel Skallingen im Nordwesten und dem Nordteil der Insel Fanoe im Süden begrenzt wird.

GRY maß leider nur je über eine Tide, am 25. 6., 24. und 25. 8. 1938, an neunzehn über das Gebiet und im Graadyb verteilten Stationen die Fließgeschwindigkeiten in der Nähe der Oberfläche und bis 1,0 m über Grund und gleichzeitig den Sinkstoffgehalt in verschiedenen Höhen bis 0,5 m über Grund. Am 25. 6. herrschte Südwestwind und der Einstrom überwog, während am 24./25. 8. Nordwind wehte und der Ausstrom stärker war. Die Größtgeschwindigkeit im Tief erreichte in jeder Richtung am 26. 8. rund 1,17 m/s. Die Tidehübe im Tief betrugen am 25. und 27. 6.: 1,08 m, am 24. 8.: 1,72 m und am 25. 8.: 1,80 m, bei einem Mittelwert für das Graadyb von 1,28 m. Die geschöpften Proben wurden nach Sand $> 0,02$ mm und nach „Schlamm“ $< 0,02$ mm getrennt. Die praktischen Ergebnisse der Messungen waren folgende:

Die Sinkstofffracht ist dort am größten, wo innerhalb der Bucht der Schlamm aus dem anstehenden Boden durch die Strömung aufgenommen wird. Sie ist bei Hochwasser am kleinsten und bei Niedrigwasser am größten, sie nimmt nach See zu ab und ist nach Überschreitung eines Schwellenwertes der Fließgeschwindigkeit, $v = 0,20$ m/s, über die Tiefe gleichmäßig verteilt. Für die Abnahme des Sinkstoffgehalts y mit der Entfernung x vom Aufnahmeort findet GRY die allgemeine Gleichung

$$y = a \cdot e^{-lx}.$$

Als Beispiel wird für die Strecke vom Nordende der Bucht bis zum Graadyb

an der Oberfläche

$$a = 173 \text{ und } l = 0,183,$$

am Grunde

$$a = 343 \text{ und } l = 0,208.$$

Die Ungleichheit der Werte steht im offenbaren Widerspruch zu der vorangegangenen Feststellung der Gleichmäßigkeit der Sinkstoffverteilung über die erfaßte Tiefe, wenn man nicht annimmt, daß auf Teilstrecken der Schwellenwert der Geschwindigkeit nicht erreicht wurde.

Die Folgerungen aus den Messungen sind nach GRY: Da der ausgehende Strom nach Stärke und Laufzeit überwiegt, wird dauernd Material aus dem Tief ins Meer geführt und vor dem Tief auf der Barre abgelagert. Wenn die Watten nicht abgetragen werden, müssen sich also die Priele vertiefen! Unter Betonung, daß die Messreihen für eine abschließende Beurteilung nicht ausreichen, wird die gesamte in einer Tide bewegte Sinkstoffmenge auf rund 4000 t eingehend und rund 5500 t ausgehend, je zur Hälfte Sand und „Schlamm“, geschätzt. Mithin ergibt sich ein täglicher Überschuß der zur See verfrachteten Bodenmengen von rund 3000 t, der mit den Baggermassen zur Offenhaltung der Fahrrinne durch die Graadyb-Barre „ganz gut übereinstimmt“.

Diese Übereinstimmung ist offenbar aber nur dann gegeben, wenn die Summe der auf der Barre nicht zur Ablagerung kommenden Sinkstoffe durch Sand ersetzt wird, der durch die küstenparallele Strömung herangeführt wird.

Die Möglichkeit des Wasseraustausches über das Watt hinter Fanoe wird erwähnt, GRY ist ihm aber nicht besonders nachgegangen. Vielleicht hätten auch die Süßwasserzuflüsse berücksichtigt werden müssen.

Die sorgfältigen Messungen GRYS verdienen, über längere Zeiträume mit wechselnden Witterungsbedingungen in dem gleichen Gebiet wiederholt zu werden. Die Voraussetzungen für die Gewinnung eindeutiger Messungsergebnisse sind hier sehr viel günstiger als in den größeren, durch Wattwasserscheiden weniger klar getrennten und gegen die See offeneren Teilgebieten des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres. Zusätzliche Feststellungen etwaiger Abtragungen

oder Aufhöhungen der Watten und der Veränderung der Prielquerschnitte könnten die Sinkstoffmessungen leicht ergänzen und kontrollieren.

Die außerordentlichen Schwierigkeiten einer zuverlässigen Erfassung der Sinkstoffführung großer Wattströme schildert PETERSEN in einem Bericht der Forschungsabteilung des Marschenbauamts Husum (83) über die Ziele, die Durchführung und die Ergebnisse umfangreicher Messungen in der Norderhever vom 14. bis 25. 8. 1937.

Nachdem in den vorangegangenen Jahren mit Strommessungen verbundene Sinkstoffmessungen an Einzelpunkten ergeben hatten, daß der Sinkstoffgehalt sowohl von Ort zu Ort, als auch an der gleichen Meßstelle von Messung zu Messung sehr stark schwankt und keine gesetzmäßigen Beziehungen zwischen Stromgeschwindigkeit und mitgeführtem Sinkstoff bestehen, wurden unter Einsatz aller verfügbaren Fahrzeuge Quer- und Längsprofilmessungen bei im allgemeinen mäßigen Winden aus wechselnden Richtungen an mehreren Tagen je über eine ganze Tide durchgeführt. Ausgesprochene Schlechtwetterverhältnisse, die in dem ausgedehnten Gebiet jede Messung unmöglich machen, wurden nicht erfaßt.

Die gleichzeitigen Geschwindigkeitsmessungen in Verbindung mit den in den Vorjahren gewonnenen Unterlagen über die während einer Tide bewegten Wassermengen erlaubten eine Berechnung der in einer Halbtide den maßgebenden Querschnitt Pellworm-Südfall der Norderhever landwärts und seewärts durchlaufenden Sinkstoffmengen in t (Trockengewicht). Die Messungen im Längsschnitt an fünf Stellen zwischen dem „Strand“ (Oberlauf der Norderhever) und der Süderoog Bake (Mündung der Norderhever), jeweils zu gleichen Zeiten in der Strommitte, ergaben ein Bild der Sinkstoffverteilung zu den einzelnen Tidezeiten (Ganglinien des Sinkstoffgehalts) und lieferten in Verbindung mit früher ausgeführten Einzelmessungen und den bereits bekannten Durchflußmengen auch die je Halbtide beförderten Sinkstoffmengen an ausgezeichneten Punkten des großen Wattstroms.

Von den vielseitigen Ergebnissen können hier nur die wichtigsten mitgeteilt werden:

a) In dem durch die Gruppenmessung erfaßten Zeitabschnitt beträgt der mittlere Sinkstoffgehalt im Querschnitt Pellworm-Südfall bei Flut- und Ebbstrom gleichmäßig 51mg/l. Frühere Einzelmessungen deuten aber darauf hin, daß der Wert durch die Witterung und die Jahreszeit bedingt ist.

Über den die Norderhever begleitenden Watten erreicht der Sinkstoffgehalt zu Beginn der Überströmung 30 bis 100 mg/l, um zur Zeit des HW auf 12 bis 19 mg/l abzufallen und mit fallendem Wasser zunächst wieder leicht anzusteigen. Es wird erwartet, daß die Werte bei stürmischen Wetterlagen infolge des Wellenschlags weit höher sind. Untersuchungen auf den Watten zwischen dem Strom und den Anlandungsgebieten stehen noch aus.

b) Der Sinkstofftransport ist über den Querschnitt ungleichmäßig verteilt. Er überwiegt bei Flut- und Ebbstrom auf der Pellwormer Seite.

c) Die Sinkstofffracht während einer Halbtide schwankt in der Meßzeit bei Flutstrom zwischen 17 872 und 25 371 t und bei Ebbstrom zwischen 15 242 und 18 754 t (Trockengewicht).

d) Die Kleinstwerte der Sinkstoffgehalte treten an allen Meßstellen des Längsschnitts im Mittel etwa eine halbe Stunde nach Thw und Tnw auf. (Ausnahme Meßstelle „Strand“, wo der HW-Kleinstwert wegen des Überströmens erheblicher Wassermengen in das Gebiet der Süderau erst anderthalb Stunden nach Thw auftritt.) Die Sinkstoffgehalte sind bei Thw wesentlich kleiner als bei Tnw. Die Höchstwerte fallen gleichmäßig in die Zeit von einer bis anderthalb Stunden vor und anderthalb bis zwei Stunden nach Tnw.

e) Die Höchstwerte des Sinkstoffgehalts nehmen vom „Strand“ zur See erheblich ab.

f) Wegen der Zunahme der Querschnittsgrößen und der bewegten Wassermengen in Richtung auf die See zeigen die je Halbtide gemessenen Sinkstoffmengen das umgekehrte Bild.

Die aus diesen Mengen berechneten Sinkstofffrachtüberschüsse sind an allen Tagen der Meßreihe im „Strand“ seewärts, an der Meßstelle Holmerfähre dagegen überwiegend landwärts gerichtet. Der gleichfalls landwärts gerichtete Überschuß bei Pellworm erreicht nicht ganz den Wert, der sich aus den Querprofilmessungen errechnet. Dagegen geht die Sinkstofffracht bei Süderoog stark überwiegend zur See. Die aus örtlichen und meßtechnischen Gründen nicht als

gleichwertig anzusehenden Messungen bei der schon auf der Grenze der offenen See gelegenen Süderoog Bake ergaben in der Halbtide geringere Sinkstofffrachten als die Messungen bei Süderoog. Die Richtungsüberschüsse schwanken zwischen 1805 t landwärts und 2241 t seewärts.

Zusammenfassend wird aus den Untersuchungen geschlossen, daß der Überschuß der bewegten Sinkstoffmengen zur Nordsee gerichtet ist, obwohl im Querschnitt Pellworm—Südfall bei einer mittleren Tide infolge des Wasserübertritts in das Gebiet der Süderau 40 bis 50 Mill. m³ Wasser mehr landwärts strömen als mit dem Ebbstrom seewärts.

Obgleich in den anderen großen Wattströmen, besonders in der Süderau, Sinkstoffmessungen bisher nicht ausgeführt werden konnten, hat dieser Schluß Anlaß gegeben, den Schlickvorrat im Wattenmeer als begrenzt anzusehen und die zukünftigen Landgewinnungsarbeiten darauf abzustellen. Das ist berechtigt, weil in der Süderau die ausströmenden Wassermengen weit größer sind als die mit dem Flutstrom landwärts gehenden und weil mit Sicherheit anzunehmen ist, daß dementsprechend hier noch mehr Sinkstoffe zur See vertrieben werden als aus der Norderhever. Außerdem bringt der starke Wellenschlag bei ungünstigerem Wetter auf den hochliegenden Wattflächen weit größere Bodenmengen in Suspension, ohne diesen gleich günstige Bedingungen für die Wiederablagerung zu geben, wie ruhigeres Wetter. Die vor der Küste angestauten Wassermengen führen sie bei verschärftem Ausstrom dann in die See in größerer Menge hinaus als die ausgeführten Messungen erkennen lassen.

Auch DECHEND (10) stellte durch Schwermineraluntersuchungen und Kalkgehaltsbestimmungen fest, daß in den äußeren Teilen der Wattströme und Priele vor der schleswig-holsteinischen Westküste der Transport von Fein- und Mehlsand zur See überwiegt. In den landnäheren Gebieten werden die feinsten Sande dagegen in Richtung auf die Küste befördert. Der Hauptteil des bewegten Materials stammt aus der Sohlenerosion der Wattwasserläufe. Strecken ohne wesentliche Materialverschiebungen zeichnen sich ab.

4. Die Wirkung menschlicher Eingriffe auf den Sinkstoffhaushalt der Tideflüsse und Watten

Der in den vorstehenden Abschnitten nachgewiesene Austausch von Schwerstoffen zwischen den Tideströmen und dem Meer kann durch Eingriffe des Menschen in die natürlichen Vorgänge stark geändert werden. HENSEN (29) bringt dafür mehrere Beispiele.

Der schwerste Eingriff ist die Abdämmung eines Tideflusses oder Wattgebietes. Das Verhältnis der Ein- zu den Ausstromgeschwindigkeiten nach Größe und Dauer wird dadurch erheblich geändert, die mit der Tide hin und her schwingende Wassermenge verkleinert sich. Eine Verminderung des Binnenabflusses ist dieser Verkleinerung gegenüber dann von geringerer Bedeutung, wenn das Verhältnis dieses Abflusses zu der von den Gezeiten bewegten Wassermenge klein ist. Aber auch sie wirkt mit, um die allgemein gegen die Küste gerichtete Sanddrift, von der weiter unten noch zu sprechen ist, weiter stromauf vordringen zu lassen. Die Vergrößerung des Tidehubs besonders durch das Absinken des Tnw, welches stets größer ist als die Hebung des Thw, verringert die Räumungskraft des Ebbstroms und verstärkt auf den geringer werdenden Wassertiefen den Einfluß der Wellenbewegung. Durch diese wird auch Sand aufgewirbelt und von Strömungen fortgetragen, deren Geschwindigkeiten allein nicht zu seiner Bewegung ausreichen würden. Ablagerungen unterhalb der Abdämmung sind die unabwendbare Folge.

Ein eindrucksvolles Beispiel hierfür bietet die Versandung der unteren Eider nach deren Abdämmung bei Nordfeld, rund 30 km oberhalb der Mündung, im Jahre 1936, über die WEINNOLDT und BAHR (123), gestützt auf Sinkstoffuntersuchungen von DITTMER und VINCK (14), berichten. Bei den Vorarbeiten war die Versandungsgefahr geprüft worden. Da aber die Ableitung der oberen Eider in den Nord-Ostsee-Kanal bei Rendsburg seinerzeit außer einem Vordringen des Schlickfalls bis zur Stadt keine nachteiligen Folgen gehabt hat und die Modell-

versuche keine wesentlichen Änderungen der Flut- und Ebbsstromgeschwindigkeiten erkennen ließen, wurden größere Versandungen unterhalb der Abdämmung nicht erwartet. Im Lauf von nur fünf Jahren drangen jedoch so große Mengen sehr feinen Sandes bis zum Sperrwerk vor, daß der Zweck der Anlage, die Sicherung der Entwässerung der großen Eidermündung, ernstlich gefährdet war.

Zur Freihaltung des Siels und der Schiffsschleuse unmittelbar unterhalb des Bauwerks ausgeführte Baggerungen erwiesen sich als zwecklos. Die eingetriebenen Sinkstoffmengen wuchsen bis 1946 auf rund 20 Mill. m³ an. Als Gegenmaßnahme zunächst probeweise durchgeführte Spülungen mit bei Flut durch das Siel eingelassenen und angestauten Wassermengen hatten keinen Erfolg. Erst das systematische Einlassen jedes zweiten Hochwassers und die Wiederabgabe der angestauten Wassermengen nach einem bestimmten Plan führten zur Freispülung einer für die Vorflut ausreichenden Rinne. Deren erneute Versandung wird dadurch verhindert, daß der einlaufende Flutstrom durch das abgegebene Wasser zurückgedrängt und seine Geschwindigkeit unter die für den Sandtransport erforderliche Grenze herabgedrückt wird.

Die Versuche zur Auffindung der günstigsten Stauhöhe, die auch von den Binnenwasserzuflüssen abhängig ist, sind noch nicht abgeschlossen. Sie haben das Ziel, den Binnenwasserabfluß intermittierend soweit zu vergrößern, wie die örtlichen Verhältnisse das zulassen. Das ursprüngliche Verhältnis des Binnenabflusses zu der hin und her schwingenden Wassermenge kann natürlich nicht erreicht werden, aber das Verfahren wird im Falle des Gelingens die einzige Möglichkeit bieten, ohne ins Gewicht fallende laufende Kosten die Erfolge der Eiderabdämmung dauernd zu erhalten.

Das Ausmaß der Sandablagerungen ist mit durch den außergewöhnlich feinen und sehr gleichkörnigen Sand in und vor der Eidermündung veranlaßt. Durch die gegen das Sperrwerk abnehmenden Fließgeschwindigkeiten ist außerdem eine gewisse Sortierung eingetreten, so daß die zur Einleitung der Bewegung des Sandes notwendigen Grenzgeschwindigkeiten von 42 cm/s bei Tönning bis auf den sehr kleinen Wert von 24 cm/s bei Nordfeld abgefallen sind. Die Mitwirkung der durch die Wellen erzeugten Turbulenz bei der Verschiebung der großen Sandmengen beweist die Feststellung eines außergewöhnlich großen Sandgehalts von 31 gr/l der in 15 cm über dem Boden entnommenen Wasserproben.

Der schwerste bisher ausgeführte Eingriff in den Haushalt eines großen Wattgebiets war die Abdämmung der Zuiderzee. Sie hat bis jetzt zu einer Aufhöhung der vor dem Abschlußdamm liegenden Platen zu Lasten einer Austiefung der Wattströme und Priele geführt. Die Umbildungen sind aber bei weitem noch nicht abgeschlossen. THIJSSE (109) schätzt die bis zur Erreichung eines Gleichgewichts noch umzulagernden Massen auf eine Milliarde m³. Woher diese Mengen kommen werden, ist eine noch offene Frage. Das Watt selbst wird sie auch bei fortschreitender Abtragung der Platen und Vertiefung der Wattwasserläufe nicht liefern können, weil deren Querschnitte von den mit den Gezeiten hin und her schwingenden Wassermengen abhängig sind. Diese werden sich mit der Zeit aber verkleinern.

Aus starken Uferabbrüchen im Norden der Insel Texel wird geschlossen, daß auch die Materialführung des vor den Westfriesischen Inseln laufenden Küstenstroms nicht ausreicht, um den Sandbedarf des Watts zu decken.

Gleiche Erscheinungen kleineren Umfangs sind bei der Eindeichung von Wattflächen die Regel. Die gemachten Erfahrungen haben zu dem Entschluß geführt, einen Teil der nach dem Bau des Hindenburgdamms besonders im südlichen Winkel zwischen ihm und dem Festland entstandenen, aber teilweise noch nicht über MThw aufgewachsenen Anlandungen einzudeichen. Der begrenzte Schlickvorrat des Wattenmeeres soll damit geschont und die entstandene Kleidecke im Interesse der zukünftigen landwirtschaftlichen Nutzung nicht zu stark werden. Das ist

unter anderen allgemein von IWERSEN (37, 38, 39) und speziell von WOHLBERG (128, 130, 136) schon vor Jahren empfohlen worden.

VII. Die Herkunft der Sinkstoffe

1. Die Sinkstoffe der Wattgebiete

Die Frage nach der Herkunft der Sinkstoffe der Wattgebiete ist durch die oben geschilderten Untersuchungen weitgehend geklärt. Sie bestehen zum überwiegenden Teil aus dem aufgearbeiteten Material alter Niederungsgebiete, auf deren Entstehung und Zerstörung hier nicht näher eingegangen werden kann. Unter anderen sei auf die Arbeiten von DITTMER (11, 12, 13) verwiesen. Durch Sackung des zum Teil auf Moorschichten aufgelagerten schweren alten Marschbodens und durch eine relative Hebung des Meeresspiegels gelangte dieses Land unter den zerstörenden Einfluß der Gezeiten⁴⁾. Priele und Wattströme schnitten sich ein. Der Wellenschlag bewirkte eine flächenhafte Abtragung überall dort, wo Bodenaufbau und Schichtung ihm Angriffsmöglichkeiten boten.

Unter der Wirkung der Strömungskräfte verlagern sich die Wasserläufe ständig (68). Die Krümmungen verschärfen sich, bis die entstandene Laufverlängerung zu Durchbrüchen in den Sehnen der Bogen führt und das für die hin und her schwingenden Wassermengen zu klein gewordene Gefälle wieder vergrößert wird. Das bei diesen Bettverlagerungen aus seinem Verband gelöste feine Bodenmaterial gerät in Suspension, das gröbere wird an den Gerinnesohlen weiter befördert und zum Teil bei Richtungsänderungen von der Strömung ausgeworfen. Es lagert sich in Randaufwürfen auf der alten Marsch ab und schützt diese dann örtlich vor dem weiteren Wellenangriff.

Eine in den ersten Jahren der Westküsten-Forschung durch terrestrische Messungen und Luftbildaufnahmen ausgeführte genaue Kartierung der nordfriesischen Wattgebiete sollte die Grundlagen für die Feststellung des zeitlichen Ablaufs dieser Veränderungen bieten. Bei der 1951 abgeschlossenen Kartierung der Dithmarscher Watten wurden erst Teilgebiete der älteren Aufnahmen erneut erfaßt. Gleichlaufende Untersuchungen in den Niederlanden haben die bisherigen Auffassungen aber bestätigt und darüber hinaus nachgewiesen, daß die Abstände der Priele Gesetzmäßigkeiten folgen und daß zwischen Flut- und Ebbewasserläufen unterschieden werden muß (119).

Über das Ausmaß der aus altem Bodenmaterial aufgearbeiteten Sinkstoffmengen besteht noch keine Klarheit. Ebenso wenig läßt sich über ihre zweifelsfreie Ergänzung durch im Watt selbst aus dem Plankton, den Resten der Wattflora und -fauna entstehenden Sinkstoffmengen schon Sicheres sagen. Der Gehalt der als Schlick abgelagerten Sinkstoffe an Humus und Kalk entsteht aber in der Hauptsache aus tierischem und pflanzlichem Leben.

2. Die Sinkstoffe der Strommündungen

Die Sinkstoffe der Strommündungen werden zum Teil aus dem Binnenland unmittelbar zugeführt, zum Teil bilden sie sich unter dem Einfluß des Seewassers aus kolloiden Aufschwemmungen feinsten Schwebstoffe. Nach Beobachtungen jüngerer Zeit trägt auch der von der

⁴⁾ In einer während der Drucklegung bekanntgewordenen Arbeit — Eiszeitalter u. Gegenwart (1954) 4/5, S. 210—215 — vertritt DITTMER mit Recht die Auffassung, daß „Der Mensch als geologischer Faktor an der Nordseeküste“ durch die Verfehnung großer Moorgebiete, die Salzgewinnung aus Torfasche und die Verhinderung der weiteren Landerhöhung durch den Deichbau die natürliche Entwicklung ungünstig beeinflußt habe.

Strömung an den Ufern und auf den den Strom und das Mündungsgebiet begleitenden Watten aufgenommene Schlick zur Anreicherung der Sinkstoffführung bei (50, 64).

Die Flockenbildung aus den Aufschwemmungen und kolloiden Lösungen, die als Schlickbildung bezeichnet wird, ist in der ganzen Welt bekannt und um die Jahrhundertwende erstmalig von VERNON-HARCOURT (121) ausführlich beschrieben worden. Trotz der sehr großen Bedeutung dieses Vorgangs für den Hafenbau und die Schifffahrt ist seine Erforschung aber noch nicht abgeschlossen. In der grundsätzlichen Erkenntnis des Naturgeschehens sind durch die Entwicklung der Kolloidchemie zwar erhebliche Fortschritte erzielt worden, viele Einzelheiten bleiben aber noch zu klären. Die dabei zu überwindenden Schwierigkeiten sind groß und nur der Einsatz erheblicher Mittel verspricht Erfolg.

Die Kolloidchemie liefert im Grundsätzlichen folgende Erkenntnisse:

Die Korngrößengrenze der Sinkstoffe gegen die kolloiden Lösungen ist fließend je nach Art dieser Lösungen. Sie kann für Wasser praktisch bei $0,2\mu$ angenommen werden. Unter dieser Größe erlangen die Teilchen eine Eigenbewegung nach Art der Molekularbewegung der echten Lösungen. Diese verhindern im stehenden Wasser das Absinken der Teilchen unter der Wirkung der Schwerkraft (23).

Die verschiedenen Gruppen der Kolloide werden durch Elektrolyte unterschiedlich beeinflusst. Die Suspensionskolloide, größtenteils anorganischer Art, koagulieren bei Hinzutritt eines Elektrolyten leicht, bilden Flocken und fallen aus. Die Emulsionskolloide organischer Art sind der Beeinflussung durch Elektrolyte sehr viel weniger zugänglich. Sie lösen sich nach Trocknung ohne weiteres in Lösungsmitteln wieder auf, während die Suspensionskolloide nicht wieder aufzulösen sind.

Wenn sich bei der Flockenbildung reversible Emulsionskolloide an irreversible Suspensionskolloide anlagern, kann es zu einer Schutzwirkung kommen, die diese dem Einfluß der Elektrolyten entzieht und eine weitere Koagulation verhindert (Schutzkolloide).

Für die Fällung von Kolloiden ist dasjenige Ion des Elektrolyten maßgebend, das dem Kolloid gegenüber die entgegengesetzte Ladung aufweist. Metallsalze sind ein geeignetes Mittel zur Ausflockung von Kolloiden mit negativer Ladung.

„Das Seewasser hat infolge seiner Beimengung an $MgCl_2$ eine starke koagulierende Wirkung, die durch das mengenmäßig mehr vorhandene $NaCl$ nicht erreicht wird. Die Gesamtwirkung des Gemisches von $NaCl$ und $MgCl_2$ ist geringer, als man nach der Koagulationsfähigkeit der einzelnen Salze vermuten könnte. Ihre Wirkungen addieren sich nicht“ (63).

Im einzelnen ist vorliegenden Veröffentlichungen folgendes zu entnehmen:

Nach den Untersuchungen von LÜNEBURG (70, 71, 72, 73a) und KÖPPEN (49) steht fest, daß an der Schlickbildung nicht nur die aus dem Binnenlande in die Flußmündungen gelangenden, bis zu kolloiden Größen aufgearbeiteten Sinkstoffe beteiligt sind, sondern auch große Mengen im Brackwasser absterbenden Planktons des Süß- und Salzwassers. Die organischen Substanzen des Planktons werden über Ammoniak größtenteils zu Nitrit (Salpetrige Säure) abgebaut. Reste gelangen mit den Skeletten der Kieselalgen aber auch in den Schlick. Eine weitere Quelle der Anreicherung des Schlicks mit Stoffen organischer Herkunft ist die Einleitung ungeklärter Abwässer der an den Flußmündungen liegenden Städte. Die Abbauzonen dieser organischen Massen kennzeichnen sich gleichfalls durch einen hohen Nitritgehalt des Wassers.

LÜNEBURG (71) faßt die Untersuchungen des Instituts für Meeresforschung in Bremerhaven an der Unterweser mit einem Ausblick auf die gleichartigen Verhältnisse in der Elbe wie folgt zusammen:

„Das aus dem Binnenlande heranströmende Süßwasser ist, wie die besonders in Elbe und Weser auffällig in Erscheinung tretende Gelbfärbung des Wassers (meist humosen Ursprungs) sinnfällig zeigt, sehr mit kolloidgelösten Stoffen belastet, die außerdem aus organogenen Abwasserderivaten und aus kolloiden Ton-, Kiesel- sowie Eisenteilchen bestehen können. Diese Kolloide werden im oberen Brackwasser plötzlich der Einwirkung eines starken Elektrolyten ausgesetzt, wobei sie in bekannter Weise infolge der Erreichung oder Überschreitung des isoelektrischen Punktes zur Koagulation gelangen, wie dieses auch an filtriertem Moorwasser mit Salzzusatz am Photometer in vitro nachgewiesen werden konnte. An die so gebildeten „Koagulationskerne“ werden bald übrige, im Wasser verteilte „quasi-kolloide“ Teilchen adsorbiert, und die Masse der gebildeten Sinkstoffe wird so immer mehr vergrößert, bis die erwähnten Trübungswolken sich herausgebildet haben, was meist, nach bisherigen Erfahrungen

in Elbe- und Wesermündung, bei 2, 3, 5 oder noch einigen Promille Salz mehr der Fall zu sein pflegt. Beim weiteren Abströmen nach See sinken sie, bei von uns festgestellten Teilchengrößen von etwa einheitlich 20 μ , in das untere Drittel des Wasserkörpers ab und können dann nicht mehr bis zur Oberfläche aufsteigen, da sie von der erwähnten Sprungschicht daran gebindert werden⁵⁾.

Die Trockensubstanz der so entstandenen Trübungsmasse besteht im Durchschnitt zu 10—20 % aus organischer Substanz und nur immer zu 2—3 % aus CaO (Kalk). Ferner wurde bei Beobachtungen über Stauwasser, das heißt bei Stromstille, ein kurzfristiges aber fast restloses Absinken der gesamten Trübungswolke an den Grund beobachtet. Die Sinkstoffmengen kommen jedoch infolge der starken Gezeitenströmungen nie zur dauernden Ablagerung im eigentlichen Stromstrich, wie Bodengreiferproben eindeutig bewiesen. Der Boden des Hauptfahrwassers der Wesermündung besteht aus Sand der verschiedensten Korngrößen und ist mit Schill u. a. vermischt.“

KÖPPEN (48) berichtet über die Vorgänge der Schlickbildung in der Emsmündung und vorbereitende Untersuchungen mit Aufschwemmungen von Kaolin und alter Marscherde im Laboratorium. Die Ausflockung des Kaolins beginnt im destillierten Wasser schon bei 0,9 ‰ NaCl-Gehalt und weniger. Die Sedimentationsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmendem Salzgehalt zu, und zwar bei Kaolin schneller als bei Marscherde. KÖPPEN schließt daraus in Übereinstimmung mit den Feststellungen LÜNEBURGS, daß die Hauptmasse des Schlicks schon bei viel geringeren Salzkonzentrationen gebildet wird, als die eigentliche Brackwasserzone mit 10 ‰ und mehr Salzgehalt besitzt.

Die Tatsache, daß in Teilen der Brackwasserzone der Ems die Wassertrübe erhalten bleibt, eine Ausflockung aber nicht eintritt, führt KÖPPEN darauf zurück, daß Humusbestandteile auf den Primärteilchen Schutzkolloide bilden, welche die Zusammenballung verhindern. Die dadurch erzielte Stabilisierung der Suspension geht aber durch das Hinzukommen von Alkalischen (Ammoniak) wieder verloren, und es tritt weiterhin doch Ausflockung ein. Die Neutralisierung der Schutzwirkung durch Steigerung der Hydroxylionen im Salzgemisch erfordert einen pH-Wert von mindestens 8, also ein alkalisch wirkendes Wasser. Die gleiche Wirkung schreibt KÖPPEN auch dem Gehalt des Seewassers an Magnesiumhydroxyd zu, das sich mit der Humussäure zu unlöslichen humussäuren Magnesiumsalzen verbindet. Die Bildung von Ammoniak führt er in Übereinstimmung mit LÜNEBURG auf den bakteriellen Abbau organischer Substanzen zurück.

LÜTTMER (74) bezeichnet die Erklärung KÖPPENS für die vorübergehende Wirkung von Humusstoffen als chemisch unhaltbar und begründet seine Auffassung eingehend. Er führt die stellenweise Erhaltung der Trübe auf die ungleichmäßige Verteilung des stark eisenhaltigen Wassers in der Ems zurück. Nach ihm entsteht die Ausflockung überall dort, wo die positiv geladenen Eisenmoleküle durch die Strömung an die negativ geladenen Tonteilchen herangeführt werden und sich an diese anlagern.

⁵⁾ Herrn Dr. Wohlenberg bin ich zu Dank dafür verpflichtet, daß er mir anlässlich der Korrektur die Arbeit von POSTMA u. KALLE: „Die Entstehung von Trübungszonen im Unterlauf der Flüsse, speziell im Hinblick auf die Verhältnisse in der Unterelbe“, Deutsche Hydr. Zeitschr. 8 (1955) 4, S. 137—144 zur Verfügung gestellt hat. Die Verfasser vertreten in Übereinstimmung mit Feststellungen LÜNEBURGS (71, 73a) die Auffassung, daß der Ausflockungsvorgang je nach der Menge der kolloidalen Beimengungen nur einen mehr oder weniger geringen Anteil zur Erhöhung der Sinkstoffkonzentration beitragen könne. Sie schließen das aus der Feststellung, daß die Extinktionswerte der von ihnen an 16 Stationen zwischen Hamburg und Cuxhaven in der Elbe entnommen und je zur Hälfte mit Seewasser und destilliertem Wasser versetzten Wasserproben auch nach dem Absetzen und erneutem Durchschütteln nahezu unverändert geblieben sind. Für die Entstehung des Trübungsmaximums an der obersten Grenze der Brackwasserzone geben die Verfasser dann die einfache Erklärung: Die Sinkstoffe sinken aus der ausgehenden Oberströmung erst allmählich in die einlaufende Unterströmung ab, reichern sie an und gelangen mit ihr an der Grenze der Brackwasserzone wieder an die Oberfläche. Sie werden in einem Kreislauf herumgeführt. „Der eigenartige Vorgang der Fluß- und Meerwasser-Vermischung wirkt demnach wie eine Sinkstoff-Falle.“

Es wird Aufgabe der weitem Forschung sein, die verschiedenen Auffassungen zu klären und den Meinungsstreit zu entscheiden.

Die Ausführungen LÜNEBURGS und KÖPPENS folgen in der Hauptsache der oben wiedergegebenen „klassischen“ Theorie der Schlickbildung. RIVIÈRE (92) wendet sich gegen einige Angriffe auf diese, glaubt aber doch dem Umstand Rechnung tragen zu müssen, daß die Sinkstoffteilchen nach vorliegenden Beobachtungen häufig schon im Zustand der Flockung oder Vorflockung in das Mündungsgebiet der Flüsse gelangen und es des Hinzutritts eines Elektrolyten des Seewassers zu ihrer Bildung nicht mehr bedarf. Das ist zweifellos richtig, ob es aber auch in anderen Fällen ohne die Elektrolytwirkung zur Flockenbildung kommen würde, ist noch nicht bewiesen. SANTEMA (98) ist der Meinung, daß die häufig gegebene Anwesenheit von Ca-Ionen im Flußwasser schon zu einer Vorflockung führt.

Nur Untersuchungen des Flußwassers oberhalb der Brackwasserzone werden Aufschluß über dessen Mineral- und Salzgehalte und den Zustand der ankommenden Trübung: dispers, Vorflockung oder Flockung, geben können. Es wird sich dann erkennen lassen, ob es sich bei den von RIVIÈRE behandelten Fällen um grundsätzliche Unterschiede der Eigenschaften der ankommenden Sinkstoffe und um andere Gesetze der Flockenbildung handelt, oder ob die alte Theorie sinngemäß auch für die Ausflockung oberhalb der Brackwasserzone gilt.

Die Einrichtung einer Wasseruntersuchungskammer in einem Strompfeiler der neuen Elbebrücke bei Lauenburg durch die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Hamburg (100) ist in diesem Sinne sehr zu begrüßen.

Als weitere Aufgabe war KÖPPEN die Ausarbeitung eines Verfahrens zur einfachen Bestimmung der mineralogenen und organogenen Kieselsäurebestandteile des Schlicks, das heißt der Schlickherkunft, gestellt (49). Versuche der Fraktionierung auf chemischem Wege waren erfolglos, weil es nicht gelang, die großen und rauen Diatomeenskelette (Kieselgur) von den anhaftenden Tonteilchen zu trennen. Ein von ihm ausgearbeitetes kombiniertes Verfahren — mit Einschaltung mikroskopischer Kontrollen — erwies sich für die Praxis als zu umständlich und teuer.

Es ergab einen Diatomeengehalt im Trockenschlick von 18,5 % an der Außenseite der Schleuse Nesserland und von 20,5 % an der Außenseite der Seeschleuse.

Im frischen Schlick des Emdener Außenhafens wurden stellenweise bis zu 70 % Kieselguranteile festgestellt. Die Forschungsstelle Norderney, in deren Auftrag KÖPPEN arbeitete, zieht aus diesen und anderen Messungen den Schluß, daß etwa ein Drittel des Schlicks und der Schlickkomponenten gröberer Sedimente im Emsgebiet selbst entsteht. Diese Auffassung findet in den Untersuchungen HUSTEDTS (36) eine Stütze, der im Emsgebiet eine sehr reiche Diatomeenflora feststellte. Von den vorgefundenen 451 Formen sind zwar nur 199 solche des Seewassers, ihre Zahl überwiegt aber bei weitem die der Süßwasserformen und derjenigen, welche im Wasser wechselnden Salzgehalts leben können. Die Zahl der Süßwasserformen nimmt gegen See zu stark ab, während die Meeresdiatomeen bei Papenburg noch mit 25,6 % an der Individuenzahl beteiligt sind.

LÜNEBURG stellte unter Benutzung des Nitrits als Indikator für den Abbau organischer Substanz in Elbe und Weser je zwei Maxima des Nitritgehalts fest, deren eines unterhalb der Abwassereinleitungen von Hamburg und Bremerhaven liegt, während sich die äußeren in Gebieten zwischen 25 und 15 ‰ Salzgehalt finden. Er schließt:

„Es scheint also doch zweifellos in diesem bei Neuwerk in der Elbe und bei Robbenplate-Wremen in der Weser gelegenen Nitritmaximum ein gewisses System vorzuliegen, das auf den ersten Blick nur dadurch zu erklären ist, daß im Brackwasserbereich von 15—25 ‰ ein größeres Absterben einerseits der stenohalinen Meeresplanktonorganismen und andererseits auch der limnischen Planktonlebewesen stattfindet.“

LUCHT (63) gibt, gestützt auf JÜRGENSONS-STRAUMANIS (41), folgende andere Erklärung

für die von KÖPPEN beobachtete teilweise Erhaltung der Wassertrübung und die Ausbildung des zweiten Trübungsmaximums:

„Die Beobachtung der beiden Trübungsmaxima in der Unterelbe erklärt sich aus der sogenannten Doppelflockung. Danach wächst die koagulierende Wirkung eines Elektrolyten zunächst an, wenn man von der niedrigsten Konzentration ausgeht, bis zu einem Grenzwert, der ein Maximum der Ausfällung hervorruft (Abb. 5). Dies ist in der Unterelbe der Fall bei einem Salzgehalt 1,5 ‰ bis 2,0 ‰. Bei einem weiteren Ansteigen des Salzgehaltes tritt zunächst keine weitere Steigerung der Ausflockung ein, sondern ein Rückgang. Erst bei einem Salzgehalt von 8 ‰ erfolgt eine Zunahme der Koagulation und führt zu der Entstehung des zweiten Maximums im Bereiche stärkeren Salzgehaltes. Die Lage der beiden Höhepunkte verschiebt sich mit der Höhe der Tide und der Menge des abfließenden Oberwassers innerhalb der oberen Hälfte der Brackwasserzone. Es liegen z. Z. bei weitem nicht soviel Trübungsmessungen

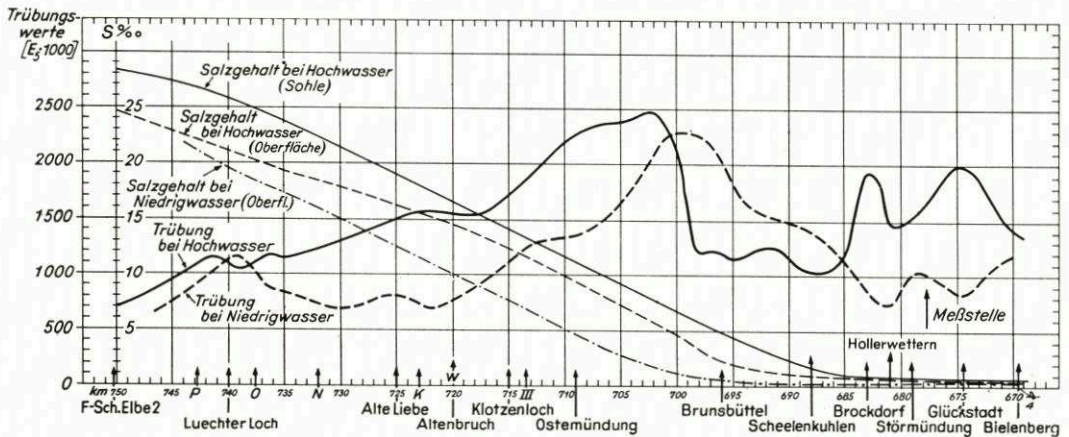


Abb. 5. Trübung und Salzgehalt in der Unterelbe [nach LUCHT (63)]

aus der Brackwasserzone der Elbe vor, wie Salzgehaltsmessungen, so daß die Lage der Trübungsmaxima, besonders ihre Verschiebung infolge verschiedener Einflüsse, nicht mit gleicher Sicherheit angegeben werden kann, wie die Lage des Maximums der Salzgehaltsschwankungen.“

„Mit zunehmender Konzentration tritt eine Umladung der kleinen Teilchen ein, dergestalt, daß ihre gerade neutralisierte Ladung durch Adsorption von Na- und Mg-Ionen positiv wird und damit wieder eine teilweise Auflösung der koagulierten Partikel eintritt. Bei weiterer Zunahme des Salzgehaltes wirken die Cl-Ionen neutralisierend auf die Kolloidteilchen ein, was zur Ausbildung des zweiten Trübungsmaximums führt.“

LUCHT fügt unter Bezugnahme auf KORTÜM (52) hinzu: „Diese Deutung ist aber nicht ausreichend und bildet allein keine Grundlage für die Ableitung quantitativer Gesetzmäßigkeiten des Schlickfalles, so daß in manchen Fällen Abweichungen zwischen Theorie und Beobachtungen auftreten. Zur Zeit ist es der Kolloidchemie noch nicht möglich, alle Vorgänge exakt zu klären, die sich bei der Koagulation abspielen.“

Eine nordamerikanische Veröffentlichung (75a) welche die Feststofffracht der Flüsse und die damit zusammenhängenden Probleme zusammenfassend behandelt, gibt nachstehende kurze, der üblichen Theorie folgende Darstellung des Schlickfalles und der Schlickbildung:

„In den Aestuarien und Häfen des südatlantischen und der östlichen Golfküste verursacht die chemische Einwirkung des Salzwassers auf die von den Flüssen herabgeführten Ton- und kolloiden Gelteilchen die Ablagerung von Ausflockungen so ungeheueren Ausmaßes, daß regelmäßig jedes Jahr Millionen von cubic-yards durch Baggerung entfernt werden müssen, um die Schifffahrtstiefen zu erhalten. Die so entfernten Massen umfassen aber nicht die gesamten Ablagerungen, ein großer Teil wird durch die Ebbeströmungen in die See hinausgeschwemmt.“

Die Ausflockung ist ein elektrochemischer Vorgang eines Basenaustausches, analog dem des Ersatzes der Zeolithe in Wasser gelagerter Pflanzen. Es entsteht ein Aluminiumhydroxysilikat mit einer Natrium-Base, deren Teilchen sich auf einmal zusammenballen und zu Boden sinken. In einfacher Sprache: Was

zuerst ein Calcium-Klei war, wird ein Natrium-Klei. Die rote Farbe geht über in ein grünliches Grau und u. U. in ein bläuliches Grau. Die so gebildeten Ablagerungen haben zunächst schlammigen Charakter („mud“ im örtlichen Sprachgebrauch), die einem Bleilot noch erlauben, bis zum Boden durchzudringen, die aber Schiffskörpern und -schrauben einen erheblichen Widerstand entgegensetzen. Wenn die Ablagerungen sich anhäufen und ungestört liegenbleiben, verdichten sie sich, und es entsteht ein fester dunkelblauer Klei, welcher Ingenieuren und Geologen als mariner Klei bekannt ist.“

Die Arbeit gibt leider keine Literaturhinweise, so daß der offenbar irrigen Behauptung, ein Calcium-Klei verwandele sich in ein Natrium-Klei, nicht nachgegangen werden kann. Der meist nicht große Kalkgehalt der Sinkstoffe findet sich im Schlick — nach zahlreichen Untersuchungen 1 bis 15 % und im Mittel 5 bis 8 % CaCO_3 — und in den frischen, durch Vegetation und Niederschläge noch nicht entkalkten Kleiböden wieder.

Auch nach KELLEY und LIEBIG (45) ist die amerikanische Spezialforschung im Grundsätzlichen nicht zu anderen Ergebnissen gekommen wie die deutsche. KELLEY (44) betont aber, daß die Bildung und die Eigenschaften des Kleis von Ort zu Ort stark wechseln.

Auf diese Unterschiede geht die bereits angezogene Arbeit von SANTEMA (98) näher ein, die im Rahmen der seit 1951 laufenden Untersuchung der Verschlickung der Rotterdamer Häfen die Schlickbildung im Rheinwasser und die Zusammensetzung der vom Fluß als Sinkstoff herangeführten Klei-Mineralien schildert. Das Mineral des Rheins und der Maaß ist fast ausschließlich Illit, ein dem Montmorillonit ähnliches Umformungs- und Verwitterungsprodukt der Urgesteine, das stark mit Kalk angereichert ist. Infolge der Kalkaufnahme befindet sich die Suspension schon fast im Zustand der Koagulation, die zum Beispiel im „süßen“ Wasser des Lek plötzlich eintritt, wenn eine Wasserprobe kurze Zeit gestanden hat. Der Verfasser glaubt, daß die Ausflockung im Fluß durch hydrodynamische Kräfte der Strömung so lange aufgehalten wird, bis sie durch Hinzukommen der ersten Seewasser-Ionen ausgelöst wird. Nach Überschreitung eines Schwellenwertes des Gehalts an Seewasser-Elektrolyt tritt dann erneut Koagulation auf.

Er verweist auf Versuche von RIVIÈRE (93), nach denen kaolinhaltige Suspensionen im Gegensatz zum Verhalten der illit- und montmorillonithaltigen schon durch Spuren von Humus gegen die Ausflockung geschützt werden. Die Feststellungen KÖPPENS in der Ems werden damit bestätigt.

Auf Grund von Flockungsversuchen mit Sinkstoffproben, denen die Humusstoffe entzogen wurden, vermutet SANTEMA, daß die Zunahme der organischen Stoffe im Flußwasser in jüngerer Zeit zu einer dichteren Lagerung des Schlicks als früher führt. Besonders wichtig ist aber seine Feststellung, daß die große örtliche Verschiedenheit der an der Schlickbildung beteiligten Stoffe und ihre unterschiedliche Reaktion im Salzwasser eine Feststellung der Art der im Sinkstoff enthaltenen Mineralien, ihrer Korngrößen, des pH-Wertes und der Kationenbesetzung notwendig mache, wenn ein zutreffender Einblick in die auftretenden Vorgänge gewonnen und Untersuchungen miteinander verglichen werden sollen.

Die von den Flüssen den Meeren ohne oder mit geringen Gezeiten zugeführten feinen und feinsten Sinkstoffe unterliegen dem Einfluß des Seesalzes in gleicher Weise wie in den Mündungsgebieten der Tideflüsse. Der Vorgang spielt sich hier aber um so weiter vor der Küste ab, je größer die abfließende Wassermenge ist und je weniger sie durch Wind und Küstenstrom abgelenkt wird. Nur wenn kleine Abflussmengen auf hohe Außenwasserstände treffen und vorübergehend Seewasser in die Mündung eindringt, tritt die Ausflockung in den äußeren Mündungsgebieten ein.

Die Haffe der deutschen Ostseeküste nehmen eine Zwischenstellung ein. Jeder Wasserstandswechsel der See bewirkt einen Wasseraustausch durch die Verbindungstiefs mit dem Haff, der auf der Innenseite in der Nähe der Mündungen Wasserkörper verschiedenen Charakters entstehen läßt. Für das Pillauer Seetief genügt bei ruhigem Wetter der sehr kleine Tidehub der

Ostsee für diesen Austausch. Die geringe Salzkonzentration reicht zur Koagulation der feinsten noch schwebenden Teilchen aus, und in den der See am nächsten gelegenen Haffteilen bildet sich Seeschlick, der sich vom Haffschlick der inneren Haffgebiete deutlich unterscheidet. Praktische Bedeutung hat der Schlickfall hier jedoch nicht.

3. Andere Sinkstoffquellen

An den dem Seegang ausgesetzten Steilküsten werden große Mengen bindiger Bodenarten aufgearbeitet und als Sinkstoff fortgeführt. DÜCKER (15) schildert den Vorgang und seine Voraussetzungen sowie die neben der Wellenenergie vom Lande her mitwirkenden Kräfte am Beispiel des Brodtener Ufers. Andernorts gelangen in früheren erdgeschichtlichen Zeiten mit feinkörnigen Süß- oder Salzwasserabsätzen ausgefüllte Täler, Mulden und Niederungen bei einer relativen Hebung des Meeresniveaus oder bei Sturmfluten in den Bereich der Wellen, werden zerschlagen und aufgearbeitet. Moordecken schwimmen auf, zerbrechen in Schollen, werden abgetrieben und zerfallen im Seegang. Ihre organischen Bestandteile werden durch Wasseraufnahme schwerer und damit auch zu absetzbaren Sinkstoffen.

Ob bei diesen vielfältigen Erscheinungen das Salzwasser wie in den Flußmündungen als Elektrolyt wirkt und zur Zusammenballung auch der feinsten kolloiden Teilchen führt oder ob chemische Umsetzungen anderer Art stattfinden, ist noch unbekannt, aber kaum von großer Bedeutung.

Im Brandungssaum kommen ebenfalls große Mengen von Meeresorganismen zum Absterben und bilden die der Menge nach stark wechselnden Anteile des Schlicks an organischer Substanz. Das durch den Wellenschlag zu feinsten Trübe aufgearbeitete Material wird durch die Strömungen fortgeführt und gelangt wie das der Flüsse schließlich in den größten strömungsfreien Tiefen der Meere und in geschützten Buchten zur Ablagerung. Ausgedehnte Schlickgebiete finden sich wie in der Nordsee so auch in der Ostsee. PRATJE (89, 90, 90a) hat ihrer Bildung besondere Aufmerksamkeit geschenkt, sieht in der wechselnden Neigung ihrer Oberfläche ein Abbild der vorherrschenden Strömungen und zieht aus den rezenten Sedimentationsvorgängen Schlüsse auf fossile Ablagerungen. Auf die angeführten grundlegenden Arbeiten näher einzugehen würde hier zu weit führen.

VIII. Schlickfall und Schlickbindung

Die Verfestigung der zu Schlickflocken koagulierten, aber auch als Einzelteilchen abgesunkenen Sinkstoffe zu mehr oder weniger dichten Ablagerungen ist ein zum Teil noch ungeklärter Vorgang. Er vollzieht sich in den Schlickfallgebieten der Tideflüsse größtenteils unter der Wasseroberfläche, ist der Beobachtung unzugänglich und meßtechnisch schwer zu erfassen. Vielleicht kann der von LÜNEBURG (73) entwickelte Schlickpegel neben der Messung der allmählichen Konsolidierung der Schlickmassen auch dazu dienen, an den mit seinen ringförmigen Ausbohrungen entnommenen Proben etwaige chemische und physikalische Umwandlungen festzustellen.

Größere Klarheit besteht dagegen über die Schlickbindung in den der Beobachtung leichter zugänglichen, bei Ebbe trockenfallenden Watten. Ohne auf die in weiten Grenzen schwankenden, nicht auf gleichen Wassergehalt bezogenen und deshalb nicht vergleichbaren Angaben über die Größe des Schlickfalls in den vielen unter ihm leidenden Häfen und Seewasserstraßen einzugehen, wird im folgenden über das berichtet, was sich in der Literatur zu den Problemen findet:

In der Elbe fand LÜNEBURG (70) in mehreren Meßreihen die Größtwerte des Sinkstoffgehalts — bis zu 1000 mg/l — unterhalb Glückstadt und in der Weser bei Blexen. Hier wächst er

von Oberflächenwerten zwischen 200 und 300 mg/l gleichfalls auf etwa 1000 mg/l in Bodennähe an.

Diese Gebiete sind auch die Zentren des größten Schlickfalls, der mit gegen die See stark abnehmenden Werten das Gesamtgebiet der vom Tidehub und den Oberwasserzuflüssen abhängigen Pendelbewegung der Trübungszone umfaßt. Die Grenzen dieser Bewegung liegen in der Elbe (72) landwärts etwa bei Brunsbüttelkoog, seewärts noch außerhalb des Feuerschiffs Elbe 1, in der Weser etwa bei Nordenham und beim Roten Sand und in der Ems landwärts etwa bei Oldersum. Über die seeseitige Begrenzung fehlen Angaben.

An keiner Stelle dieser Gebiete sind aber die Sinkstoffe gleichmäßig über den Querschnitt verteilt. LÜNEBURG glaubt in der Weser nicht nur eine Abhängigkeit des Schlickgehalts von der Stromgeschwindigkeit, sondern in Übereinstimmung mit LUCHT (63) auch vom Salzgehalt feststellen zu können. Dementsprechend ist die Verteilung nicht nur in der Waagerechten von der Bewegung der verschiedenartigen Wasserkörper abhängig, sondern wechselt neben der allgemeinen Zunahme der Konzentration gegen die Sohle auch in der Senkrechten und hier besonders an den Sprungschichten.

In Gebieten, in denen eine Sprungschicht nicht zur Ausbildung kommt, der Salzgehalt klein wird und über die Tiefe gleichmäßig verteilt ist, quellen schlickreiche Wassermengen der Tiefe auch bis zur Oberfläche auf. LÜNEBURG beobachtete dieses Aufquellen an verschiedenen Stellen der Weser, besonders aber am oberen Ende der Brackwasserzone bei einem Salzgehalt von etwa 3 bis 5 ‰ und meint, daß das Auftreten dieser auch in der Elbe festgestellten Trübungswolken an der Oberfläche ein zuverlässiger Indikator für diesen Salzgehalt ist.

In der Emsmündung weisen die Trübungswolken sehr ungleichmäßige Sinkstoffgehalte auf, und ein Mittelwert der Konzentration ist nur schwer festzustellen (48).

Mit abnehmenden Strömungsgeschwindigkeiten und kleiner werdender Turbulenz vor und nach der Stromkenterung sinken die Sinkstoffe mit den schwersten beginnend ab. Durch die wiederauflebende Wasserbewegung nach der Kenterung werden sie von der zunehmenden Strömung aber wieder aufgenommen, so daß außer zur Zeit der Stromkenterung auf der Stromsohle kein Schlick sondern nur Sand zu finden ist. Nur an strömungsgeschützten Stellen und besonders in vom Strom abzweigenden Hafenbecken, Vorhäfen, toten Winkeln und auf den nur zeitweise und mit geringer Geschwindigkeit überströmten Vorländern und Watten bleibt der Schlick liegen. Die zunächst stark wässerigen Ablagerungen verstärken sich und werden unter dem Druck der hinzukommenden Mengen dichter, aber niemals fest, soweit sie bei NW nicht trockenfallen.

Über die Art der außerdem bei der Konsolidierung der Ablagerungen mitwirkenden Kräfte, ob in der Hauptsache chemisch oder physikalisch, bestehen noch Meinungsverschiedenheiten, wie der Arbeit von RIVIÈRE (92) zu entnehmen ist. Zum Beweis seiner eigenen Auffassung, daß die durch die Flockung der abgesetzten Teilchen vergrößerten Adsorptionskräfte die alleinige Ursache der verhältnismäßig festen und schnell wachsenden Bindung frisch abgesunkener Schlickteilchen untereinander und an bereits abgelagerte sind, verweist er auf einen Versuch folgender Art:

„Eine tonige, gut entflochte und dispergierte Suspension, deren Elemente fast unbegrenzte Zeit suspendiert bleiben, wird geteilt. Der eine Teil wird nach Zusatz eines Flockungsmittels kräftig geschüttelt. Beide Teile werden sodann zentrifugiert und zum Absetzen sich selbst überlassen. Bei der Probe mit Elektrolytzusatz bleibt die über dem Bodensatz stehende Flüssigkeit klar, und der Bodensatz kann durch mechanisches Aufrühren nur sehr schwer wieder in Suspension gebracht werden. Bei der nicht behandelten Probe verliert der Bodensatz bald seine scharfe Begrenzung infolge Diffusion der nicht geflochtenen Teilchen in die darüber stehende Flüssigkeit. Man erkennt also, daß, wenn die Schlicke der Flußmündungen und Küsten nicht geflockt wären, ihre kolloiden Partikel, wie im Experiment beschrieben, das Bestreben hätten, spontan in das darüber befindliche Wasser zu dispergieren. Durch die langsamsten Strömungen oder die geringste Bewegung würden sie weit davongeführt werden.“

Der Schlickfall ist bei gleicher Schwebstoffkonzentration um so stärker, je größer die Wassertiefe ist. In Hafenbecken ist er aber nicht nur von deren Tiefe, sondern auch von der Weite der Einfahrt abhängig, weil die Dichteunterschiede zwischen salzreicherem und salzärmerem Wasser und die dadurch zustande kommenden Strömungen einen um so schnelleren und intensiveren Wasserumsatz zwischen Strom und Becken bewirken, je größer der Dichteunterschied und die Verbindungsöffnung sind. Der Wasserumsatz umfaßt also nicht nur die durch Beckenfläche und Spiegelunterschied bei HW und NW gegebene Wassermenge, sondern bei breiten und ungünstig gelegenen Einfahrten das Mehrfache des Gesamthalts (30, 63).

Die Größe des Schlickfalls ist für alle betroffenen Häfen bekannt. Die in m oder cm angegebenen Zahlen vermitteln zwar ein Bild von der möglichen Behinderung der Schifffahrt, sie sind aber nicht unmittelbar vergleichbar, da in der Regel der Feststoffgehalt nicht erfaßt wird. Besser vergleichbare Zahlen liefern die gebaggerten Schlickmengen, weil die Baggerungen erst angesetzt zu werden pflegen, wenn die abgelagerten Mengen hinderlich werden und dann schon konsolidierteren Schlick umfassen.

Gleichwohl beträgt der Wassergehalt des Naßschlicks bis zu 90 %. Für den sogenannten spittreifen (stichfesten) Schlick wird mit 60 % gerechnet, während der abgelagerte krümelige Schlick immer noch 35 bis 40 % Wasser enthält.

In den ost- und nordfriesischen Watten findet sich die zum Ausfallen des Schlicks aus der mit der Flut herangeführten Trübungswolke notwendige Voraussetzung abklingender, durch Strömung und Wellenschlag erzeugter Turbulenz in Küstennähe und im Wind- und Strömungsschutz der Inseln und Halligen. Gegen die Hochwasserzeit nehmen die Strömungsgeschwindigkeiten ab, um erst längere Zeit nach HW wieder größer zu werden. Die geringen Wassertiefen in Landnähe lassen unter normalen Witterungsverhältnissen auch die Bildung eines Wellenschlags mit größerer Turbulenz nicht zu. Luftereinwirkung und Sonneneinstrahlung während der Zeit, in der die Watten trockenfallen, sorgen für eine zusätzliche Verklebung und Haftung der abgelagerten dünnen Schlickschicht.

Die Messungen GRYS und der Forschungsabteilung in Husum zeigen, daß der Sinkstoffgehalt der im Wattengebiet mit den Gezeiten hin und her pendelnden Schlickwolke über deren Ausdehnung ungleichmäßig verteilt ist. Das Maximum liegt nach GRY mit etwa 500 mg/l bei HW über den Schlickaufnahmegebieten und bei NW mit etwa 400 mg/l in Küstennähe.

Die Messungen WOHLBERGS (136) südlich des Hindenburgdamms bei Windstille und ruhiger See ergeben ein ausgezeichnetes Bild von der Sinkstoffverteilung über die Tiefe und Länge des Wattstroms bei Flut- und Ebbstrom. Am Grunde des Hauptvorflutgrabens des Anwachsens stieg der Sinkstoffgehalt bei einsetzendem Flutstrom von rund 100 auf 868 mg/l. Dem Anstieg folgte bis zum Thw ein Wiederabfall auf 53 mg/l. Unter schwierigen Bedingungen bei Westsüdweststurm unmittelbar am Damm um die Hochwasserzeit und 10 cm unter der Oberfläche entnommene Proben ergaben auf der Luvseite bis über 3000 mg/l anwachsende Werte, während die Konzentration in Lee des Damms nur $\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{3}$ dieser Sinkstoffmenge erreicht. Auf die eindrucksvolle Schilderung des schnellen Anwachsens, besonders auf der Südseite des Damms, und die dabei mitwirkenden Faktoren muß verwiesen werden. Sie zeigen unter anderem mit ausgezeichneten Lichtbildern die Mitwirkung der Diatomeen an der Schlickbindung bei der primären und sekundären Sedimentation, den Einfluß der Sturmfluten und des Winters auf die Wattoberfläche und die Leistungen der verschiedenen Pflanzengesellschaften — Queller und Andel — für den weiteren Aufwuchs. Die umfassende Darstellung WOHLBERGS erübrigt es, auf ältere Arbeiten einzugehen, welche die Schlickablagerung und -bindung und die dabei wirkenden Lebensvorgänge im einzelnen schildern. Als Wegbereiter der fortschreitenden Erkenntnis dieser Vorgänge seien aber in ungefähr zeitlicher Ordnung folgende Autoren genannt: Trus-

HEIM (111), SCHWARZ (103), WOHLBERG (125, 129, 131, 132), KOLUMBE (51), BROCKMANN (5, 6, 7), LINKE (60) und HUSTEDT (36).

Humus- und Kalkgehalt sind für die spätere landwirtschaftliche Nutzung der Ablagerungen von großer Bedeutung. HERRMANN (31) bringt Zahlen aus eigenen und älteren Untersuchungen. Der Humus entsteht, soweit er nicht aus aufgearbeiteten älteren Bodenschichten stammt, aus den organischen Resten der Wattflora und -fauna. Zum Teil bildet er sich nach IWERSEN (40) auch erst nach der Trockenlegung der Anlandungen (Eindeichung) durch die Tätigkeit aerober Bodenbakterien. Der Kalkgehalt wurde bisher auf die Schalen und Kalkpanzer der Wattiere zurückgeführt. MASCHHAUPT (75) vermutet daneben eine Entstehung durch physikalisch-chemische Prozesse, die an den Watträndern zu einer Praecipitation aus dem Seewasser führen.

KÖNIG (47) und PLATH (85) erarbeiteten die Zusammenhänge zwischen den zahlreichen Wattbewohnern und der Art der Sedimente. OSTENDORFF (80) lieferte im Rahmen der Arbeiten der Westküstenforschung eine Bodenbestandsaufnahme der nordfriesischen Watten nach Verfahren der landwirtschaftlichen Bodenkunde. Ziele und Grenzen der zukünftigen Landgewinnungsarbeiten an der schleswig-holsteinischen Westküste wurden damit in Zusammenarbeit von Fachleuten aller Zweige der Naturwissenschaft und erfahrenen Ingenieuren festgelegt.

Die Maßnahmen, mit denen der Mensch seit langer Zeit die Schlickablagerung zu fördern sucht, um den natürlichen Anwachs zu beschleunigen und ihn schneller deichreif werden zu lassen, sind oft beschrieben und bekannt.

Die ihnen zugrunde liegende Idee hat aber erstmalig WOHLBERG (136) aufgezeigt. Nach ihm beruht „das ökologische Prinzip der Landgewinnung“ auf der Vegetation und auf dem Wassergehalt des Sediments. Dieses muß durch die Spatenarbeit — Auswerfen der Gröppen und Bildung der Beete — aus dem Zustand der Wasserübersättigung in den der Untersättigung überführt werden.

Zahlenangaben über die Schlickbildung beim Durchgang durch den Darmkanal der Mollusken finden sich schließlich bei KAMPS (43). In flachen Kästen im Watt von Groningen ausgesetzte 80 Exemplare von Lamellibranchen nahmen nach seinen Messungen in vierzehn Tagen 4,5 kg (Trockengewicht) Schlick auf und gaben ihn durch Schleim verfestigt wieder ab.

Nach der gewonnenen Erkenntnis, daß der Schlickvorrat des Wattenmeeres hauptsächlich durch die Aufarbeitung alten untergegangenen Kulturlandes und aus tieferliegenden tonigen, in den Wattströmen und Prielen angeschnittenen Schichten ergänzt wird, während gleichzeitig der Abstrom der Sinkstoffe zum Meere größer ist als der Zustrom, müssen die Landgewinnungsarbeiten in erster Linie darauf gerichtet sein, den Schlickfall durch bauliche Maßnahmen so zu lenken, daß mit kleinsten Schlickmengen eine möglichst große Fläche wertvollen Kulturbodens geschaffen werden kann.

IWERSEN ist daher wiederholt dafür eingetreten, die Aufschlickung auf ein Maß zu beschränken, das auf die Dauer die besten landwirtschaftlichen Erträge sichert (37, 38, 40). Es war erklärlich, daß diese Forderung besonders bei tiefliegenden, der üblichen Auslegung des Begriffs der „Deichreife“ noch nicht entsprechenden Aufschlickungsgebieten Widerständen begegnete. IWERSENS jüngste Arbeit (40) legt diesen Begriff endgültig fest und liefert an Hand der Schilderung umfangreicher Anbauversuche auf eingedeichten Wattböden die Grundlagen für die Lösung dieses Problems.

IX. Die Strandriffe als Bildungen schwebenden Sandes

Die vielfältigen Sandbildungen an flachen Küsten, die auf die den vorherrschenden Winden oder den Gezeitenströmungen folgende Sandwanderung zurückzuführen sind, sind bekannt und

häufig geschildert. Für die ostfriesische Inselreihe behandelten WALTHER (122a), HIBBEN (33), GAYE und WALTHER (22) und KRÜGER (55, 56), für die Ostsee besonders OTTO (81) und PRATJE (90, 90a) in grundlegenden Arbeiten die Erscheinungsformen und deren ständige Veränderungen. Man ist geneigt, sie als Bildungen des auf dem Vorstrand von der Strömung rollend und gleitend bewegten Sandes anzusehen und den Wellen nur insoweit eine Mitwirkung zuzugestehen, als die Orbitalbewegung der ungebrochenen und die fortschreitende Geschwindigkeit der gebrochenen Welle den Sand in gleicher Weise auf der Sohle in Bewegung setzt und bei der Formgebung der Gebilde mitwirkt.

Für die Mehrzahl der Sandbildungen ist diese Erklärung zutreffend. Bei den bekannten Strandriffen reicht sie jedoch nicht aus. EVANS (19) leitete 1940 aus Beobachtungen und Messungen am Michigansee eine „Suspensionstheorie“ ab, fand aber Widerspruch. Neuere Beobachtungsergebnisse und Modellversuche lassen jedoch darauf schließen, daß diese oft in größerer Zahl auftretenden Bildungen in der Hauptsache durch den Ausfall des Sandes aus dem Schwebezustand entstehen.

Zur Begründung dieser Auffassung seien folgende Forschungsergebnisse und eine Theorie angegeben, welche die Behandlung der Strandriffe im Zusammenhang mit den Sinkstoffen rechtfertigt.

Die Strandriffe sind an flache Vorstrandneigungen gebunden. Je geringer diese sind und je stärker die Höhenlage des mittleren Seespiegels und die Wellenhöhe wechseln, desto größer kann die Zahl der hintereinander liegenden Riffe werden. OTTO (81) stellte an der pommerschen Ostseeküste bis zu fünf Riffe fest. Im Tidegebiet übersteigt ihre Zahl selten zwei. Sie erstrecken sich meist parallel zur Strandlinie und erreichen, dann durch einzelne Öffnungen unterbrochen, Längen von vielen Kilometern. Aber auch dachziegelartig übereinandergreifende Formen werden beobachtet, deren Längsachse einen Winkel zur Strandlinie bildet. Sie kennzeichnen sich dadurch als Wellenbildungen und ihre Längsachse als abhängig von der Wellenanlaufriechung. Küstenparallele Strömungen, die ältere Forscher für ihre Bildung allein verantwortlich machen, wirken in der Hauptsache bei ihrer Formung mit.

SHEPARD (105) bringt aus einem sehr umfangreichen von der Scripps Institution of Oceanography gesammelten Beobachtungsmaterial zahlreiche Beispiele der Bildung und Umformung der Strandriffe bei verschiedenen Wellenhöhen und bei deren Wechsel. Die Linie, in der sie sich bilden, ist abhängig von der Lage des Punktes, an dem die gebrochene Welle „eintaucht“. Das Riff bildet sich unmittelbar vor diesem Punkt unter der zusammenstürzenden Welle. Die Ursache der Bildung an dieser Stelle sieht SHEPARD in der Interferenz und hält der von EVANS (19) geäußerten Ansicht, daß die Riffe aus suspendiertem Material gebildet würden, entgegen, daß das nur teilweise richtig sein könne, weil der Sand längs des Scripps-Piers manchenorts von See gekommen sei. Eine Begründung, die die EVANSche Meinung durchaus nicht ausschließt.

Den Hauptteil seiner Arbeit widmet SHEPARD der Ableitung gemittelter Beziehungen der Tiefenlage der Riffkronen zu der der Rifftäler und zwischen diesen beiden Größen und der Wellenhöhe, welche zu ihrer Bildung führte. Die letztgenannten Beziehungen dienen dem Vergleich der Natur mit Modellversuchen und lassen erhebliche Unterschiede erkennen, die weiter unten erklärt werden. Die erste Gruppe der Vergleiche ergibt keine klare Abhängigkeit der beiden Hauptabmessungen der Strandriffe von den als verantwortlich für ihre Bildung angenommenen Wellenhöhen. Ein Zeichen dafür, daß ihr natürlicher Wechsel und die Nebeneinflüsse im Modell nicht erfaßt worden sind.

Die von SHEPARD zur Erklärung der Riffbildung angezogene „Interferenztheorie“ nach BRAUN und HARTNACK (28) nimmt an, daß die Strandriffe sich dort bilden, wo eine auflaufende Welle auf das zurückflutende Wasser der vorangegangenen trifft und die Transportkraft bei-

der Bewegungsrichtungen durch den Zusammenprall soweit herabgesetzt wird, daß der mitgeführte Sand liegenbleibt.

WIRTZ (124) fand bei Geschwindigkeits- und Sandfallmessungen in der Kösliner Bucht unabhängig von EVANS jedoch dessen Auffassung bestätigt. Er nimmt an, daß sich durch Zusammenprall und Brandung Zonen erhöhter Turbulenz bilden, die Sand in hohem Maße in Suspension bringen und erhalten. Die durch die Wellen herangeführten Wassermengen werden größtenteils nach der Seite in der Richtung des herrschenden Windes abgedrängt und nehmen als küstenparallel verlaufender Brandungsstrom über dem Boden den Sand schwebend mit.

WIRTZ folgert:

„Aus turbulenten Strömungen, die als Transportbänder des Sandes dienen, fallen bei nachlassender Stromgeschwindigkeit und Turbulenz die suspendierten Sandkörner nach ihrer Korngröße aus; es entsteht dann erst das Riff.“

Er belegt seine Meinung unter anderem mit den in Abbildung 6 wiedergegebenen Messungen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit abnehmender Windgeschwindigkeit und durch Bohrungen (Abb. 7) auf Riffkämmen, die eine nach innen und unten vom Feinsand bis Kies zunehmende Korngrößenverteilung ergaben.

Die Beobachtungen von WIRTZ werden durch die Untersuchungen LINKES (61) am Nordstrand von Norderney großenteils bestätigt. Auch LINKE stellt fest, daß die Strandriffe in der Gezeitenzone bei Sturm verschwunden sind und sich erst in der nachfolgenden Schönwetterzeit langsam wieder bilden. In ruhigen Zeiten ändern sie ihre Lage nicht, während schon eine kurzfristige mittelstarke Brandung sie um mehrere Meter strandwärts verschieben kann.

KEULEGAN (46) untersuchte die Riffbildung in zwei Gerinnen von 46 cm und 4,27 m Breite, 61 cm und 1,22 m Tiefe und 9,15 bzw. 26 m Länge bei Vorstrandneigungen von 1:15; 1:30; 1:50 und 1:70 unter Verwendung von Sand einer mittleren Korngröße von 0,42 mm und

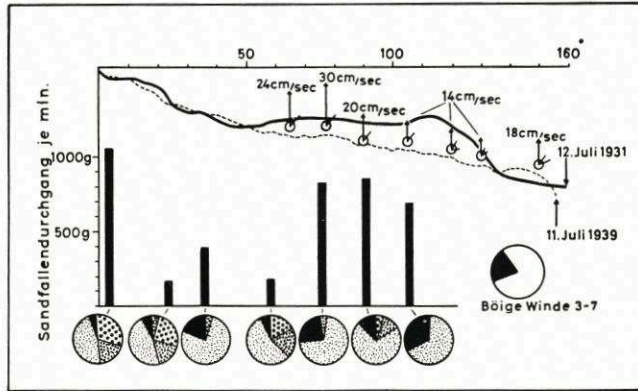


Abb. 6. Sandfallen- und Strommessungen in einem in der Umsetzung begriffenen Riff [aus: WIRTZ (124)]
Abzisse oben = Entfernung vom Strand. Wassertiefe bei 160 m = rund 4,20 m

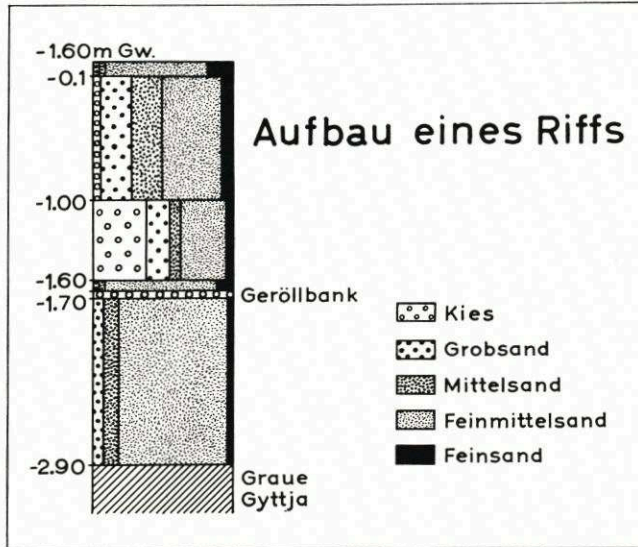


Abb. 7. Ergebnis der Kornanalyse der Bohrung in einem Strandriff [nach WIRTZ (124)]
Die Riffsohle liegt bei -1,70 m

Flachwasserwellen verschiedener Höhe und Periode. Seine Hauptergebnisse waren folgende:

- Über dem Punkt der Sohle, an dem der Wellenkamm überzukippen beginnt, ist die landwärts gerichtete Sandbewegung am größten. Sie nimmt gegen das sich bildende Riff ab.
- Dort, wo die gebrochene Welle untertaucht, wird die Sohle angegriffen. Das losgeschlagene Material wandert zum Teil rückwärts gegen das Riff, zum Teil in Richtung auf den Strand.
- Das Riff bildet sich also zunächst als flache Sandwelle vor dem Punkt, an dem die gebrochene Welle „untertaucht“.
- Die weitere Entwicklung des Strandriffs zeigt Abbildung 8.

Zu beachten ist die fünffache Überhöhung des Tiefenmaßstabs der Auftragung. Aber auch unverzerrt aufgetragen sind die Riffhänge der Endformen zu steil und die Kronen zu schmal.

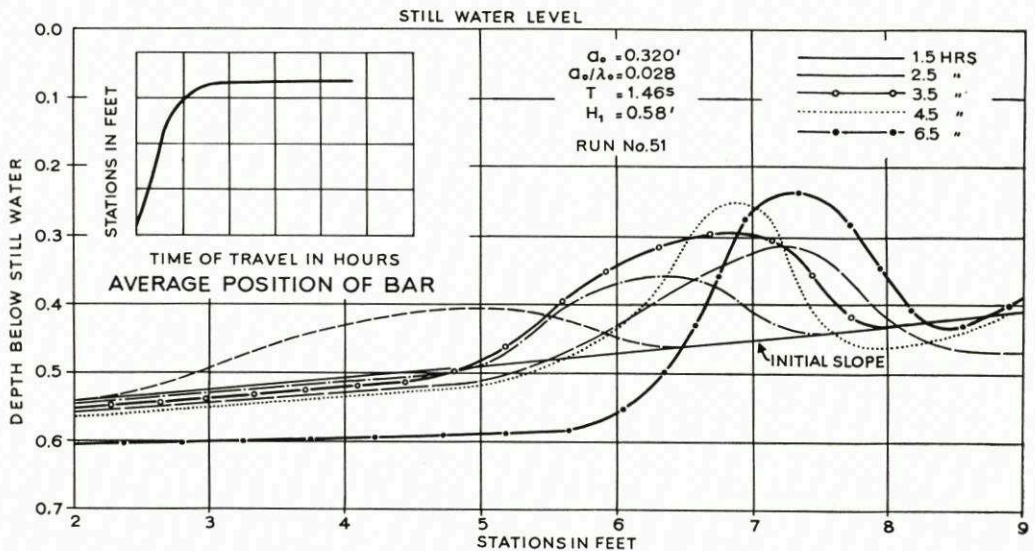


Abb. 8. Entwicklung eines Strandriffs im Modellversuch in 6,5 Stunden [nach KEULEGAN (46)]

| | |
|-----------------------------------|---------------------|
| Wellenhöhe a_0 im Modell | = 0,320' = 0,0976 m |
| Wellenhöhe λ_0 im Modell | = 1,14' = 0,348 m |
| Wassertiefe links v. Bildrand H | = 0,58' = 0,177 m |

Das ist offenbar auf die im Modell fehlende abschleifende und die Formen ausgleichende küstenparallele Strömung und darauf zurückzuführen, daß die maschinell erzeugte Wellenform und -periode bis zum Abbruch des Versuchs gehalten wurde, wenn sich ihre Form im Riffbereich mit fortschreitender Riffbildung auch änderte.

e) Die Lage des Riffs auf dem Vorstrand ist eine Funktion der Wellenhöhe und des Verhältnisses der Wellenhöhe zur Wellenlänge. Bei gleicher Wassertiefe und Wellenhöhe, aber kleiner werdender Wellenlänge wandert das Riff strandwärts. Das gleiche tritt ein, wenn Wellenhöhe und -länge konstant bleiben, aber die Wassertiefe größer wird. Umgekehrt verschiebt sich das Riff auch dann seawärts, wenn Wellenhöhe und -länge wachsen, ohne daß sich das Verhältnis der beiden Größen zueinander ändert. Bei steileren Vorstrandneigungen als 1:30 vertieft sich die Ausgangssohle see- und landwärts des Riffs.

f) Weitere Beziehungen, die KEULEGAN für das Verhältnis der Riffhöhe zur Sohlenbreite, der Rinnentiefe zur Wassertiefe usw. glaubt ableiten zu können, haben aus dem unter d) angegebenen Grund offenbar nur für die Modellversuche Geltung. Das zeigt auch der mitgeteilte Vergleich natürlicher Strandriffquerschnitte mit den durch die Versuche gewonnenen (Abb. 9).

Die zur Aufstellung der — in dimensionslose Form gebrachten — Gleichungen verwendeten Größen sind in der Natur zum Teil nur schwer oder überhaupt nicht festzustellen. Auf die Wiedergabe dieser Gleichungen wird daher verzichtet. Der Wert der Arbeit liegt in der Hauptsache in der Sorgfalt der Messungen in zwei Maßstäben.

Sie bringt unter anderem eine Darstellung der alle 15 cm durch ein sehr einfaches Verfahren gemessenen, oben unter a) erwähnten Sandbewegung. Die gegebene Erklärung für die Abnahme der bewegten Sandmengen in Richtung auf das sich bildende Strandriff ist aber unklar

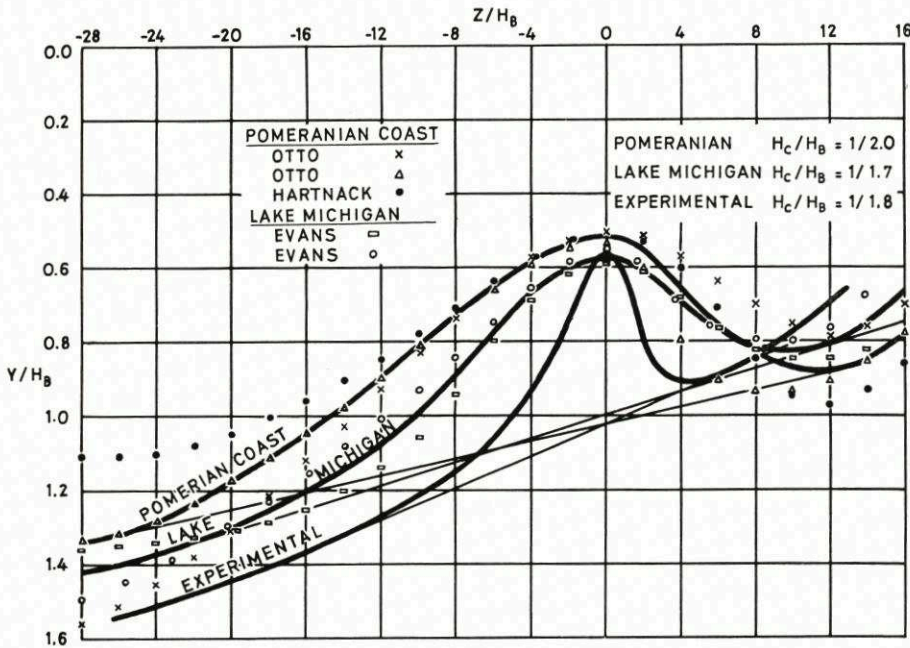


Abb. 9. Vergleich natürlicher Strandriffe mit dem des Modellversuchs

H_C = Wassertiefe über Riffkrone vom Ruhespiegel aus

H_B = Wassertiefe über Riffsohle vom Ruhespiegel aus

Y = Wassertiefe über dem Schnittpunkt der strandseitigen Riffböschung mit der Ausgangssohle. Neigung der Ausgangssohle 1 : 50

[aus: KEULEGAN (46)]

und offenbar nicht stichhaltig. Viel näher liegt die Erklärung der Abnahme der auf der Sohle bewegten Sandmengen durch die unter der brechenden Welle schnell zunehmende Wirbelbildung und Turbulenz, die fortschreitend mehr Sand von der Sohle in Suspension bringt. Hier bestehen offenbar maßstabbedingte Unterschiede zwischen Modell und Natur, wenn die steilen Flanken der Modellriffe es auch möglich erscheinen lassen, daß der verwendete grobe Sand teilweise in Suspension gegangen ist.

Trifft diese Annahme zu, so ist die Suspensionstheorie von WIRTZ und EVANS zum Teil durch die Versuche KEULEGANS bestätigt. Es bleibt aber, und das betont auch WIRTZ, noch zu klären, wie aus dem suspendierten Material das Riff selbst entsteht.

WIRTZ fand bei starker Brandung nur den untersten Sockel des Riffs und nimmt an, daß sich dieses in der Hauptsache erst durch den Ausfall des schwebenden Sandes beim Nachlassen der Wellenbewegung und verminderter Turbulenz bildet. Diese „Turbulenztheorie“ setzt jedoch

eine so starke Anreicherung des Wassers mit Sand im kritischen Bereich voraus, daß daraus nicht nur die Sanddrift laufend, wenn auch mit abnehmender Intensität gespeist wird, sondern auch die Hauptmasse des Riffs aufgebaut werden kann. Ob die Sandanreicherung so groß werden kann, daß nach dem WIRTZschen Beispiel das Riff von einem zum anderen Tag entsteht, ist zweifelhaft und muß noch geprüft werden. Großer Sandvorrat am Vorstrand, feinkörniges Material und besonderer Witterungsablauf wären jedenfalls die Voraussetzungen dafür. Die von WIRTZ untersuchten Riffe bestanden zum größten Teil aus Mittelsand von 0,2 bis 0,5 mm Durchmesser mit einem Feinsandanteil (0,1—0,2 mm) von nur etwa 20 %. Seine bei schon abgeklungener Wellenbewegung 10 bis 15 cm über Grund ausgeführten Sandfallenmessungen ergaben bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen 14 und 30 cm/s einen Durchgang von 650 bis 350 g/min, der wegen der Ungenauigkeiten und Fehlerquellen der Messung aber nicht zu Schlüssen auf die in Bewegung befindliche Gesamtmenge benutzt wird.

LINKE (61) schildert die Schwierigkeit der Sinkstoffmessung im Brandungsraum. Es gelang ihm aber durch den Einsatz von Schwimmern, welche mit Tauchgeräten und Flossen ausgerüstet waren, die Brandungszone zu durchschwimmen und die schwebend beförderte Sandmenge in einem 400 m langen Profil, senkrecht zum Strand von Norderney, der ungefähren Größenordnung nach zu vermitteln. Selbst bei einem Nordweststurm von 8 bis 10 Beaufort konnte an 22 Punkten dieses Profils, je elf an der Oberfläche und am Grunde, der mittlere Sandgehalt des Wassers zu 0,3 bis 0,6 cm³/l bestimmt werden. In der aus diesen Werten zu rund 50 000 m³ in 24 Stunden errechneten Gesamtmenge des bei Sturm auf einer Breite von 400 m des Vorstrands schwebend beförderten Sandes sind die auf und dicht über der Sohle laufenden Sandmengen nicht enthalten.

Bei geringeren Wind- und Strömungsgeschwindigkeiten wird der Gehalt des Wassers an schwebendem Sand viel kleiner. Damit gewinnt seine Feststellung, daß sich das Riff erst während einer auf einen Sturm folgenden längeren Schönwetterzeit bildet, an Wahrscheinlichkeit.

Zieht man die Ergebnisse der ausgeführten Modellversuche zur Erklärung der Riffbildung mit heran, so ergibt sich eine wahrscheinliche und einfache Erklärung wie folgt:

Der untere aus größerem Material bestehende Teil des Riffs entsteht dort, wo die strandwärts gerichtete Strömung unter der anlaufenden Welle auf die Rückströmung der vorangegangenen trifft und die Schleppkraft momentan stark abnimmt (Interferenztheorie). Seewärts des dadurch zunächst gebildeten Walls wird Sand durch die Wirbelbildung unter der brechenden Welle angehoben und durch den sich bildenden Schußstrahl gegen den Strand fortgetragen. Dieser Strahl zerschellt hinter dem Riffsockel durch Aufprall und unter der Wirkung des rücklaufenden Wassers der vorangegangenen Welle. Er löst sich in neue Wirbel und Walzen auf, deren Drehung — unterstützt durch die am Boden einsetzende Rückströmung — gegen das Riff und riffaufwärts gerichtet ist. Die zunehmende Rückströmung zerstört die Wirbel und läßt den Sand über Krone und landseitigem Hang des Riffsockels ausfallen, soweit er nicht durch die aus der Anhäufung der Wassermengen im Brandungsbereich entstehende küstenparallele Strömung in der Schwebe gehalten und mit ihr fortgetragen wird. Das Strandriff wächst, verbreitert sich nach der Landseite und verschiebt sich bei unverminderter Wellenwirkung langsam gegen den Strand. Abklingender Seegang und die Strömung sorgen für eine Verflachung und Verbreiterung seiner Form.

Ob die hier entwickelte Entstehung der Strandriffe im einzelnen richtig ist, ließe sich durch Modellversuche bei Verwendung eines feinen Sandes aus sehr leichten Stoffen und unter Nachbildung der küstenparallelen Strömung sicher feststellen. Grundsätzlich gibt aber die Verbindung der Interferenz- und der Turbulenztheorie nach WIRTZ und EVANS eine treffende Erklärungsmöglichkeit. Für die Mitwirkung der küstenparallelen Strömung bietet die Flußkunde dabei noch folgenden Vergleich an:

Die ersten Messungen von WIRTZ erfaßten die Riffbildung „in statu nascendi“. Der küstenparallele Strom ist bereits ausgebildet und zeigt landwärts der Brandungslinie die größten Geschwindigkeiten der waagerechten Strömungskomponente. Nach ihrer Entstehung hat diese Strömung aber Schraubenform und entspricht damit den bekannten Strömungen auf den Übergangsstrecken zwischen zwei Krümmungen in Flüssen, die zur Bildung langgestreckter Sandbänke führen. Auch WIRTZ schreibt:

„Wirbelbildung an den Flanken scheint eine nicht geringe erosive und akkumulative Wirkung auf die Riffe zu haben, welche letztere ja bereits tote Formen sind, wenn die Rinnen noch zum Abfluß dienen. So muß man annehmen, daß die Riffe unmittelbar nach ihrer Entstehung symmetrisch gebaut sind, wenngleich dieser Zustand auch nur von sehr kurzer Dauer ist.“

Die bei langen Strandriffen regelmäßig zu beobachtenden Durchrisse sind eine zwangsläufige Folge der durch die Wellen dauernd vergrößerten Wassermenge des landwärts des Riffs laufenden Stroms. Sie schafft sich Entlastungsöffnungen, reißt durch sie einen Teil des Sandes mit, der sich über den Vorstrand ausbreitet und erneut in das Spiel der anlaufenden Wellen gerät. Die Beobachtungen LINKES bestätigen diesen Vorgang.

SHEPARD glaubt, daß aus diesem Sand weitere Strandriffe seewärts vor dem zuerst entstandenen aufgeworfen werden, und schreibt: *„Das Anwachsen dieser Riffe ist begrenzt durch die Wassertiefe, über welcher die Wellen brechen und die weitere Sandzufuhr unterbinden.“* WIRTZ läßt die Frage der Lage weiterer Riffe offen und äußert sich zu ihrer Bildung nur wie folgt:

„Die einmal entstandene vordere Turbulenzzone scheint auf dem Wege der Verstärkung zur Bildung weiterer Turbulenzstreifen führen zu können, je nachdem, ob der verfügbare Brandungsstrom genügend breit ist. Die Einzelheiten dieses letzteren Vorgangs sind dem Verfasser noch völlig unklar.“

Unverändertes Meeresniveau und gleichbleibende Wellenlänge und -höhe vorausgesetzt, hat SHEPARDs Meinung nur für einen sandarmen Vorstrand Geltung. Die aus der See anlaufenden Wellen brechen zuerst über der ihrer Höhe entsprechenden Tiefe von rund 1,5—2 h. Findet sich hier genügend Sand, so wird das äußerste Riff zuerst gebildet. Aus der Brandung entstehen aber neue Systeme niedrigerer Wellen, die landwärts erneut brechen und weitere „Turbulenzstreifen“ erzeugen, die bei ausreichendem Sandvorrat die strandnäheren Riffe bilden. In der Regel wird aber die Entstehung von mehr als zwei Strandriffen auf Änderung des Wasserstandes und der Wellenhöhe zurückzuführen sein. Stets ist die Bildung mehrerer Riffe ein sicheres Zeichen für die ausreichende Speisung des Strandes mit Sand.

X. Zusammenfassung und Folgerungen

Der Überblick über den Stand der Sinkstoffforschung in den Binnengewässern versucht die Schwierigkeiten aufzuzeigen, die trotz großer Bemühungen noch zu keiner allgemein befriedigenden Lösung der Sinkstoffprobleme geführt haben. Nur laufende Messungen der Sinkstofffracht werden dort weiter führen können, wo ein Bedürfnis für genaue Ermittlungen besteht. Großer personeller und apparativer Einsatz ist dazu erforderlich.

Die in den Vereinigten Staaten entwickelte Theorie der Sinkstoffverteilung in der Lotrechten eines Flußquerschnitts kann diesen Aufwand bei günstigen örtlichen Abflußbedingungen verkleinern, aber der erzielbaren Genauigkeit der Ergebnisse sind dabei Grenzen gesetzt.

Die unter dem Einfluß der Gezeiten, des Windes, des Zuflusses aus dem Binnenlande und der Dichteströmungen dauernd wechselnden Abflußbedingungen in den Tideflußmündungen lassen eine zuverlässige Bestimmung der Sinkstoffführung besonders in den äußeren Teilen der Mündungsgebiete nicht zu, in denen die wasserführenden Querschnitte bei höheren Wasserständen nicht mehr sicher abzugrenzen sind. Man wird sich hier mit Teilmessungen begnügen müssen, die bei genügender Zahl und räumlicher sowie zeitlicher Ausdehnung Schätzungen der Sinkstoff-

fracht nach Richtung und Größe ermöglichen. Die dazu erforderlichen Meßgeräte stehen zur Verfügung oder sind in der Entwicklung.

Vorgeschlagene halbempirische Berechnungsverfahren lassen dagegen nur mehr oder weniger rohe Schätzungen der in abgegrenzten Gebieten während bestimmter Zeiten stattfindenden Materialbewegungen und -umlagerungen zu. Der gerichtete Transport kann mit ihrer Hilfe mengenmäßig nicht erfaßt werden. Aber auch solche angenäherten Feststellungen können wertvolle Hinweise auf bestehende Entwicklungstendenzen der Fahrrinnen und Sände bieten. Ihnen sollte daher in leicht veränderlichen Mündungsgebieten besondere Sorgfalt gewidmet werden.

Die Strom- und Flußmündungen in Meeren mit Gezeiten haben verschiedenen Charakter, je nachdem in ihnen der Ebb- oder der Flutstrom überwiegt. Aus beiden gelangen Schwerstoffe bis ins Meer, wenn bei den letzteren in der Hauptsache auch nur im Austausch mit Seesand. Die Sinkstoffe der Mündungsgebiete ergänzen sich ununterbrochen durch unmittelbare Zufuhr aus dem Binnenlande und durch Neubildung in der oberen Brackwasserzone. Eine Abhängigkeit der Neubildung von bestimmten Salzgehaltsverhältnissen durch Flockenbildung aus der kolloiden Trübung und echten Lösungen besteht offenbar. Zum endgültigen Nachweis und zur Gewinnung zahlenmäßiger Beziehungen müssen Sinkstoffmessungen in größerem Umfang durchgeführt werden als bisher. Zwar wird sich der Schlickfall nicht verhindern lassen, aber die bessere Kenntnis der Schlickbildung bietet unter Umständen Möglichkeiten, ihn durch strombautechnische Maßnahmen so zu lenken, daß er der Schifffahrt weniger hinderlich wird als bisher. Von der Vervollkommenung des wasserbaulichen Modellversuchswesens kann auch bei der Lösung schwieriger Probleme eine wesentliche Hilfe erwartet werden.

Im Gegensatz zu den Fluß- und Strommündungen bildet sich in den Wattgebieten neuer Schlick nur in zahlenmäßig noch nicht nachgewiesenem, wahrscheinlich geringem Umfange. Die Masse der hier durch die Tideströmungen bewegten Sinkstoffe entstammt dem Watt selbst, und ihr Vorrat ist begrenzt. Deshalb verlangt die Forderung unbedingt Beachtung, mit ihnen hausälterisch umzugehen und den Schlickfall wenn nötig durch Früheindeichung auf das für die spätere landwirtschaftliche Nutzung des gewonnenen Neulands notwendige Maß zu beschränken.

Das Problem der Konsolidierung der Schlickmassen in den Strommündungen hat zur Zeit weniger technische als wissenschaftliche Bedeutung. Trotzdem sollte die Lösung dieses Problems in der Zusammenarbeit mit der Kolloidchemie angestrebt werden mit dem Ziel, Verfahren zu entwickeln, die zu einer schnelleren Verdichtung und zur Verringerung des Wassergehalts führen. Schon ein erzielter geringer Erfolg würde zu einer Ersparnis an Baggerkosten führen, die den Einsatz der erforderlichen Mittel rechtfertigen.

Die Schlickbildung der im Gezeitenwechsel trockenfallenden der Luft- und Sonneneinwirkung ausgesetzten Watablagerungen und die dabei mitwirkenden Lebensvorgänge sind in der Hauptsache erforscht. Das „ökologische Prinzip der Landgewinnung“ weist den Weg für die Nutzbarmachung des Anwachs. Es bleibt jedoch zu klären, ob die klassischen auf Handarbeit beruhenden Methoden der Landgewinnung nicht durch den Einsatz geeigneter Maschinen verbilligt werden können.

Abschließend wird mit der Bildung der Strandriffe ein Grenzgebiet zwischen den Sinkstoffen und dem Sand gestreift. Der Schilderung mag entnommen werden, daß auch zwangsläufig unvollkommene, weil mit unzureichenden Meßgeräten und unter schwierigsten Bedingungen ausgeführte Messungen die Klärung der Vorgänge im Brandungssaum der Meere wesentlich fördern können.

XI. Anhang: Die Theorie der Sinkstoffführung in Flüssen und Strömen

Die amerikanische Theorie der Sinkstoffbewegung ist ausführlich in dem Bericht Nr. 3: „Analytical Study of Methods of Sampling suspended Sediment“ der umfassenden Schriftenreihe (114) wiedergegeben. Ihr sei zunächst die Formulierung einiger Begriffe der Turbulenzforschung entnommen:

Turbulenz einer Strömung ist ein Zustand, bei dem sich Wasserteilchen an jedem Punkt des betrachteten Querschnitts oder Wasserkörpers nicht nur in der allgemeinen Strömungsrichtung fortbewegen, sondern ihre Richtung und Geschwindigkeit mit der Zeit unregelmäßig wechseln. Bei ausgebildeter Turbulenz sind die Richtungs- und Geschwindigkeitsschwankungen nicht periodisch, sondern unregelmäßig und zufällig. Ihre Frequenz gehorcht jedoch dem allgemeinen Streuungsgesetz der Statistik.

Turbulenz Austausch ist der Austausch impulsbehalteter Wasserteilchen oder Körper zwischen verschiedenen Orten oder Schichten des Querschnitts infolge der Richtungs- und Geschwindigkeitsschwankungen. Er wird nach PRANDTL durch den „Austauschkoeffizienten“ ε charakterisiert, der sich aus der zwischen zwei Schichten der Strömung an jedem Punkt herrschenden Scherspannung τ , der Dichte ρ und der Neigung dv/dy der Kurve der Geschwindigkeitsverteilung in der Lotrechten wie folgt berechnen läßt:

$$\tau = \rho \varepsilon dv/dy \quad (1)$$

Der PRANDTLsche Ausdruck „Mischungslänge“ l bedeutet schließlich die mittlere Weglänge, welche die sich mit der Geschwindigkeit u in beliebiger Richtung bewegenden Wasserteilchen zurücklegen, bis sie auf andere Teilchen oder Wirbel stoßen, an die sie ihre mitgeführte Energie abgeben, um an deren Weiterbewegung teilzunehmen. Dabei besteht die allgemeine Beziehung

$$u \cdot l = \varepsilon^3. \quad (2)$$

Die augenblickliche Sinkstoffkonzentration N an einem Punkt der Stromvertikalen in der Höhe y über der Sohle ist gleich der mittleren Konzentration \bar{N} zu- oder abzüglich der Konzentrationsänderung ΔN , welche gleichzeitig durch die Turbulenz veranlaßt wird:

$$N = \bar{N} \pm \Delta N \quad (3)$$

Beharrungszustand der Strömung vorausgesetzt, wird die Sinkstoffkonzentration in der Lotrechten bestimmt durch die lotrechten Komponenten $u \uparrow$ und $u \downarrow$ der örtlichen Geschwindigkeit einerseits und durch die Fallgeschwindigkeit c der Sinkstoffteilchen infolge der Schwerkraft andererseits. Mithin ist

$$\bar{N} u \uparrow = \bar{N} u \downarrow + \bar{N} c \quad (4)$$

Im Beharrungszustand sind die Bewegungsgrößen aufwärts und abwärts gleich groß, und es kann gesetzt werden

$$\bar{N} u = \bar{N} c \quad (5)$$

Aus der Zusammenfassung von (3) und (5) ergibt sich

$$(\bar{N} \pm \Delta N) \cdot u = \bar{N} u \pm \Delta N u = \bar{N} c \text{ und}$$

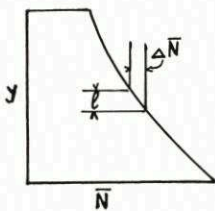
$$\text{da } u = 0, \quad \pm \bar{N} u = \bar{N} c$$

Weil ΔN und u immer gleichgerichtet sind (+ oder -) kann geschrieben werden

$$\bar{N} u = \bar{N} c \quad (6)$$

Nimmt man nun eine Sinkstoffverteilung nach nebenstehender Skizze an, so ist ihr zu entnehmen

$$\Delta \bar{N} = l \frac{d \bar{N}}{d y} \quad (7)$$



$$\text{Aus (5) und (7) ergibt sich } \bar{N} l \frac{d \bar{N}}{d y} = \bar{N} c = \varepsilon \frac{d \bar{N}}{d y} \quad (8)$$

Die Integration liefert

$$\ln \bar{N}/N_a = - c \int_a^y dy/\varepsilon \quad (9)$$

als allgemeine Gleichung der Sinkstoffverteilung in der Lotrechten in Beziehung zu einer bekannten Sinkstoffkonzentration im Punkt a der gleichen Lotrechten.

Die Gleichung ist lösbar, wenn nach dem PRANDTLschen Vorbild ε durch die Scherspannung in der Höhe y nach (1) ersetzt wird, und wenn man für die Form der Linie der lotrechten Geschwindigkeitsverteilung dv/dy bestimmte Annahmen macht.

Bei einer Tiefe T und einem Gefälle J des Wasserlaufs wird die Scherspannung in der Höhe y über der Sohle

³⁾ Überstrichene Symbole bezeichnen Mittelwerte.

$$\tau = (T - y) \gamma J \text{ und } \varepsilon = \frac{(T - y) \gamma J}{\varrho \cdot d v/d y} \quad (10)$$

Für die durch dv/dy charakterisierte Form der lotrechten Geschwindigkeitsverteilung sind verschiedene Ansätze möglich. Die amerikanische Gemeinschaftsarbeit hält auf Grund zahlreicher Messungen die Übertragung der von v. KARMAN für die Geschwindigkeitsverteilung in rauen Rohren entwickelte Gleichung auf Flüsse und Ströme für möglich und verwendet sie wegen ihres physikalisch richtigen Aufbaus. v. KARMAN fand:

$$x = 1 + \frac{\sqrt{\tau_0/\varrho}}{0,4 v_m} (1 + \ln z), \quad (11)$$

in welcher 0,4 eine experimentell bestimmte universelle Konstante und

$$\tau_0 = \gamma T J \text{ und } z = y/T \text{ ist.}$$

Für (11) kann dann geschrieben werden

$$\bar{v}/v_m = 1 + \frac{\sqrt{\gamma \cdot T J}}{0,4 v_m} \cdot (1 + \ln y/T). \quad (12)$$

Setzt man für v_m die CHEZY-EITELWEYNSche oder die von den Amerikanern bevorzugte Geschwindigkeitsformel von MANNING ein, so vereinfacht sich (11) zu

$$x = 1 + 14,2/C (1 + \ln z) \quad (13)$$

$$x = 1 + 9,50 n/T^{1/6} (1 + \ln z).$$

Differenziert man weiter (12), so findet man

$$d \bar{v}/d y = \frac{\sqrt{\tau_0/\varrho}}{0,4 y}$$

und durch Einsetzen dieses Wertes in (10)

$$\varepsilon = 0,4 T \cdot \sqrt{\tau_0/\varrho} \cdot (1 - z) \cdot z. \quad (14)$$

Hiermit wird aus (9)

$$\ln N/N_a = -\frac{c}{0,4 \sqrt{\tau_0/\varrho}} \int_a^z dz/z \cdot (1 - z). \quad (15)$$

Trägt man den Ausdruck $\int_a^z dz/z (1 - z)$ graphisch über der Tiefe auf, so ergibt sich eine Kurve, die für alle praktischen Fälle als gerade Linie angesehen werden kann. Die Integration wird dadurch einfach und ergibt

$$\bar{N} = \bar{N}_a \cdot e^{-16 t (z - a)} \quad (16)$$

mit $t = c \cdot \sqrt{\tau_0/\varrho}$.

Setzt man für τ_0 wiederum $\gamma \cdot T J$ ein und multipliziert die Glieder von (16) mit den entsprechenden der MANNINGSchen oder CHEZY-EITELWEYNSchen Gleichung so erhält man

$$t = \frac{0,0086 c}{(n/T^{1/6}) \cdot v_m} \text{ oder } \frac{0,0057 c \cdot C}{v_m}, \quad (17)$$

wobei die Fallgeschwindigkeit c in cm/s, die mittlere Geschwindigkeit in der Vertikalen v_m aber in ft/s und die Tiefe T in ft eingesetzt sind ($1 \text{ ft} = 0,3048 \text{ m}$). Der Beiwert C der CHEZY-EITELWEYNSchen Gleichung wird dabei aus dem Rauigkeitsbeiwert der MANNING-Formel errechnet mit $C = 1 : n/T^{1/6}$. T ist dabei wieder in ft einzusetzen.

(Manningformel: $v_m = 1/n \cdot T^{2/3} \cdot J^{1/2}$).

Die Auftragung der Gleichung (16) auf halblogarithmischem Papier ergibt wiederum eine gerade Linie, die mit der Neigung $16 t$ ohne weiteres gezeichnet werden kann, wenn die Sinkstoffkonzentration an einem Punkt der Lotrechten bekannt ist.

Für die Berechnung von t gibt die Veröffentlichung (114, 3) ein Nomogramm, auf das verwiesen sei. Außerdem enthält die Arbeit Auftragungen in dimensionsloser Form der Sinkstoffverteilung in der Lotrechten für Werte von t von 0,001 bis 1,0, der Geschwindigkeitsverteilung nach v. KARMAN in Abhängigkeit von der Rauigkeit und eine Darstellung der geringen Abweichungen der berechneten Geschwindigkeitsverteilung von der nach amerikanischer Auffassung natürlichen. Diese Kurve zeigt die Größtgeschwindigkeit in etwa 15 % der Tiefe und biegt in Spiegelhöhe etwas zurück, während bei der theoretischen nach v. KARMAN die Geschwindigkeiten bis zum Spiegel ansteigen. Die Unterschiede der von den beiden Geschwindigkeitsprofilen eingeschlossenen Flächen betragen dabei weniger als 1 %.

Die Sinkstofffracht jedes durch eine Lotrechte repräsentierten Querschnittsabschnitts wird dann durch punktweise Multiplikation der nach (16) ermittelten Sinkstoffkonzentration mit der dazugehörigen Fließgeschwindigkeit oder durch Multiplikation der aus den lotrechten Flächen beider Größen rechnerisch oder graphisch festgestellten Mittelwerte N_m und v_m gewonnen. Die rechnerische Ermittlung unter Zu-

grundelegung der vorstehend geschilderten Verfahren, (16) und (13), führt zur Gleichung des Gesamtgehalts eines Querschnittsabschnitts an Sinkstoff der Fallgeschwindigkeit c

$$S(c) = \Phi v_m T \bar{N}_a e^{-16tz}, \quad (18)$$

worin \bar{N}_a wieder die gemessene Konzentration in der Höhe a über der Sohle ist. Φ ist eine Funktion von t und der relativen Rauigkeiten $n/T^{1/6}$ oder C . Sie gibt das Verhältnis der mittleren Sinkstoffkonzentration in der Vertikalen zu der an der Sohle an.

Die Berechnung von Φ aus

$$\Phi = \left[(1 + 9,50 n/T^{1/6}) \cdot \int_0^1 e^{-16tz} \cdot dz \right] + \left[9,50 n/T^{1/6} \int_0^1 e^{-16tz} \ln ez \cdot dz \right] = \\ = \left[(1 + 14,2/C) \cdot \int_0^1 e^{-16tz} \cdot dz \right] + \left[14,2/C \cdot \int_0^1 e^{-16tz} \ln ez \cdot dz \right] \quad (19)$$

ist sehr umständlich. (114, 3) bringt deshalb eine graphische Darstellung der Funktion Φ in Abhängigkeit von t für relative Rauigkeiten $n/T^{1/6}$ von 0,01; 0,02 und 0,03. Diese zeigt, daß der Rauigkeitseinfluß nur bei größeren t -Werten von einiger Bedeutung ist.

Die Grundgleichungen für die Scherspannung τ (1) und für das vorausgesetzte Gleichgewicht der Sinkstoffverteilung $\bar{N} \cdot c$ (8) haben auch andere Forscher für Berechnungen gewählt. Sie rechnen dann aber mit einer anderen Form der Geschwindigkeitsverteilung in der Lotrechten. Zu erwähnen ist besonders ROUSE (96). Er wählt die allgemeine Exponentialform

$$\frac{dv}{dy} = \frac{V \tau_0/\rho}{K \cdot y},$$

schaltet dann die sohlennahe Schicht von der Dicke a durch $\eta = y - a$ aus und kommt zu der Gleichung

$$\bar{N} = \bar{N}_a \left(\frac{1 - \frac{\eta}{\eta_0}}{1 + \frac{\eta}{\eta_0}} \right)^P$$

mit $p = \frac{c}{K \sqrt{\tau_0/\rho}}$ und $\eta_0 =$ Wert von η in Spiegelhöhe.

Um den Wert der Theorie für die Praxis abschätzen zu können, ist es notwendig, besonders die auf Seite 12 des Berichts geschilderten Voraussetzungen und Vereinfachungen einer kritischen Betrachtung zu unterziehen. Vom Ingenieurstandpunkt aus ergibt sich dabei folgendes:

a) Die Voraussetzung eines zweidimensionalen gleichförmigen Abflusses — auch hinsichtlich der örtlichen Sinkstoffkonzentration — ist berechtigt, weil die Einzel-(Punkt-)messung nur Sekunden erfordert.

b) Auch eine gesetzmäßig verteilte Turbulenz muß vorausgesetzt werden, um eine Rechnung überhaupt ansetzen zu können. Die Annahme verlangt gleichförmige Querschnitte in geraden Flußstrecken und in genügend großem Abstand von oberhalb liegenden Flußkrümmungen und anderen Bettunregelmäßigkeiten. Das sind Forderungen, die für jeden Meßquerschnitt ohne Rücksicht auf Meßverfahren und -geräte gestellt werden müssen, wenn zuverlässige Ergebnisse erwartet werden sollen.

c) Die Ausschaltung einer sohlennahen Zone ergibt sich zwangsläufig aus der Unmöglichkeit, die Öffnung eines Schwebstofffängergeräts bis unmittelbar an die Sohle heranzubringen, ohne von dem in Riffeln wandernden Sohlenmaterial etwas mitzufangen. Die Begründung mit der Ausschaltung der Sprungbewegung ist nicht stichhaltig. Diese fördert im Vergleich zu der sehr hohen Konzentration der Sinkstoffe in der gleichen sohlennahen Zone so wenig feste Stoffe, daß ihr Einfluß auf die mittlere Konzentration einer Vertikalen weit geringer ist, als die der nicht erfaßten Sinkstoffschicht. Je nach dem mit dem Fangerät erreichbaren tiefsten Entnahmepunkt ist der dadurch veranlaßte Fehler verschieden groß, aber immer unvermeidlich.

Zur Zeit in der Entwicklung begriffene Schöpfergeräte suchen bis in unmittelbare Sohlennähe zu gelangen. Es ist jedoch fraglich, ob die Messungsergebnisse dadurch verbessert werden können. Der unvermeidliche Stau jedes Geräts führt zwangsläufig zu einer Änderung des als zweidimensional vorausgesetzten Strömungsbildes und die sich mit zunehmender Annäherung des Geräts an die Sohle vergrößernde Umströmung wirbelt leichtbewegliches Sohlenmaterial auf. Die dadurch entstehenden Meßfehler sind von den Korngrößen dieses Materials abhängig und auch durch großmaßstäbliche Modellversuche kaum zu erfassen.

Von der Theorie her gilt weiter folgendes:

d) Für die Ermittlung des Austauschkoeffizienten der Turbulenz ε aus der Scherspannung τ wird mit der Dichte reinen Wassers $\rho = \gamma/g$ gerechnet. Der Einfluß der Wassertemperatur auf γ ist gering und durch Temperaturmessungen leicht auszuschalten. Nicht erfaßt und erfaßbar ist aber der Einfluß des unbekannten Gewichts der im Wasser enthaltenen Sinkstoffe. Es ist anzunehmen, daß hier Analogien zu dem Einfluß der Wassertemperatur auf den Geschiebetransport bestehen. SEIFERT (104) berichtet, daß die in der Preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau durchgeführten Versuchsreihen eine

erhebliche Abhängigkeit der geförderten Geschiebemengen von der Wassertemperatur ergeben haben. Der Geschiebetrieb wird um fast 100% größer, wenn sich die Temperatur im natürlichen Schwankungsbereich von + 2° auf + 25° C erhöht, wobei sich die kinematische Zähigkeit um 46% verkleinert. Auf der anderen Seite ist im Bereich der molekularen Größen (BROWNSCHE Bewegung) seit langem das gleiche bekannt. Der durch die Vernachlässigung des Sinkstoffgewichts gemachte Fehler ist größenordnungs-mäßig daher vorläufig nicht abzuschätzen.

e) Das gleiche gilt von der gleichzeitigen Voraussetzung, daß die im Wasser enthaltenen schwereren Sinkstoffteilchen die Bewegungen der Wasserteilchen vollkommen mitmachen. Das würde der Fall sein, wenn sich der Austausch der Wasserteilchen in der Turbulenz auf geraden Bahnen vollziehen würde. Das ist sicher nicht der Fall. Bei gekrümmten Bahnen treten aber Schleuderkkräfte auf, deren Wirkung besonders bei größeren und schwereren Sinkstoffteilchen zu deren Austritt aus den Wasserteilchen führen kann, in denen sie schweben.

In den Vereinigten Staaten wird diesem Umstand bei der Ausbildung und Lage der Eintrittsöffnungen moderner Sinkstoffanggeräte große Aufmerksamkeit gewidmet. Er dürfte bei dem Rechnungsansatz nicht unbeachtet bleiben.

f) Schließlich ist die Annahme sicher unzutreffend, daß die Fallgeschwindigkeit im fließenden Wasser gleich der im ruhenden Wasser sei. Ein experimenteller Beweis dafür ist wegen der außerordentlichen versuchstechnischen Schwierigkeiten zwar noch nicht erbracht, jedoch lassen sich nach Ansicht von LABAYE (58) Analogieschlüsse aus der Theorie der Emulsionen ziehen, welche HURST (35) bei Messungen der Konzentration einer einheitlichen Mischung in Abhängigkeit von der Tiefe bestätigt fand.

Es besteht also die Notwendigkeit, die in der amerikanischen Theorie offenbar unvollständigen Definitionen von ϵ und c zu ergänzen. Für den Austauschkoefizienten werden dabei die Erfahrungen mit kolloiden Lösungen und Emulsionen herangezogen werden können. In der organischen Chemie rechnet man zum Beispiel mit einem Wachsen der Zähigkeit kolloider Lösungen mit deren Konzentration nach einem Exponentialgesetz.

Die Bestimmung der Fallgeschwindigkeit c kleiner Teilchen im fließenden Wasser erfordert schwierige und sehr umfangreiche Versuche, bei denen Gewicht, Form und Oberflächenbeschaffenheit der Körper ebenso variiert werden müssen, wie die Zahl der gleichzeitig auf engem Raum fallenden Teilchen. VANONI (115) ist bereits zu dem grundsätzlichen Ergebnis gekommen, daß für c im fließenden Wasser andere Werte gelten als im stehenden. Über den Einfluß der Körperform auf die Fallgeschwindigkeit im fließenden Wasser würde auf den umfangreichen Versuchen aufgebaut werden können, die unter anderen HEYWOOD (32) ausgeführt hat. Der Report Nr. 4 des Interdepartmental Committee bringt eine Zusammenfassung der vorliegenden Ergebnisse. LABAYE berichtet (58) über Arbeiten von SURDY, der eine Verkleinerung der Fallgeschwindigkeit kleiner Quarzkörner in kaolinhaltigem Wasser auf rund $\frac{1}{10}$ der normalen feststellte.

Schließlich wird es im Hinblick auf Literaturangaben über angebliche Sinkstoffgehalte von 50% und mehr notwendig sein, die Frage der größtmöglichen Sinkstoffkonzentration im ruhenden und fließenden Wasser aufzugreifen.

XII. Schriftenverzeichnis

1. ALLEN, F. H.: Das Themse-Versuchsmodell. Eine Studie des Verschlickungsproblems. Übers. aus „Dock and Harbour“, S. 373, 1952.
2. ANNOTATED BIBLIOGRAPHY ON SEDIMENTATION. Sedimentation Bulletin No. 2. U.S. Government Printing Office, Washington 1950.
3. BAAK, I. A.: Regional petrology of the southern north-sea. Diss. Leiden 1936.
4. BRAUDEAU, G.: Quelques techniques pour l'étude et la mesure du débit solide. Mémoires et Travaux de la Société Hydrotechnique de France. Vol. 1, S. 33—42, 1951.
5. BROCKMANN, C.: Diatomeen und Schlick im Jade-Gebiet. Abh. Senckenbg. Ges. 430, 1935.
6. BROCKMANN, C.: Küstennahe und küstenferne Sedimente in der Nordsee. Naturw. Ver. Bremen 30, 1/2, 1937.
7. BROCKMANN, C.: Die Watt-Diatomeen der schleswig-holsteinischen Westküste. Abh. Senckenbg. Ges. 478, 1950.
8. CROMMELIN, R. D.: De herkomst van het zand van de waddenzee. Tijdschr. Kon. Ned. Aardr. Gen. 57, 3. S. 347—361, 1940.
9. CROMMELIN, R. D. u. MAASKANT, A.: Untersuchungen im Stromgebiet der Weser und Elbe. Mededeelingen van de Landbouwhoogeschool, 44. Verhandeling 2, S. 1—18, Wageningen 1940.

- 9a. DANIEL: Bericht zum 28. Internationalen Schiffahrtskongreß in Rom 1953. Übersetzung aus *De Ingenieur* 66, 34/35, 1954.
10. DECHEND, W.: Sedimentpetrologische Untersuchungen zur Frage der Sandumlagerungen im Watt Nordfrieslands. *Dtsch. Hydrogr. Zeitschr.* 3, 5/6, S. 294—303, 1950.
11. DITTMER, E.: Schichtenaufbau und Entwicklungsgeschichte des Dithmarscher Alluviums. *Westküste* 1, 2, S. 105—150, 1938.
12. DITTMER, E.: Zur Verbreitung altinterglazialer Meeresablagerungen in Nordfriesland. *Westküste* 2, 1, S. 123—127, 1939.
13. DITTMER, E.: Die nacheiszeitliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Westküste. *Meyniana* 10, 1952.
14. DITTMER, E. und VINCK, F.: Der Sinkstoffhaushalt der Eider. Unveröff. Bericht, Kiel 1950.
15. DÜCKER, A.: Über die physikalischen Eigenschaften der das Brodtener Ufer aufbauenden Bodenarten und ihre Bedeutung für den Steiluferrückgang und die Errichtung eines Uferschutzwerks. *Die Küste* 1, 2, S. 21—33, 1952.
16. EDELMAN, E. H.: Die Petrologie der Sande der niederländischen Flüsse Rijn, Lek, Waal, Merwede, Geldersche Yssel. *Ass. Intern. d'Hydrologie scientifique*, 6. Assemblée générale à Edinbourg, *Bull. No. 22*, 1936.
17. EDELMAN, E. H.: Petrology of recent sands of the Rhine and the Meuse in the Netherlands. *Journ. Sedimentary Petrology* 8, 2, S. 59—66, 1938.
- 17a. EINSTEIN, H. A.: The bed-load function for transportation in open channel flows. *U.S. Dept. Agri. Tech. Bull. No. 1026*, 1950.
18. ERTL, O.: Die Gestaltungsvorgänge am Saalachsee bei Reichenhall und an anderen Stauräumen in alpinen Gewässern. *Deutsche Wasserwirtschaft* 34, 1939.
19. EVANS, O. F.: The low and ball of the eastern shore of Lake Michigan. *Jour. Geology* 58, S. 476, 1940.
20. FUTU LI: Die Regelung des Hwangho. *Diss. Hannover* 1933.
21. GAYE, J.: Entwicklung und Erhaltung der ostfriesischen Inseln. *Zentralbl. d. Bauverw.* 54, 22, S. 293—300, 1934.
22. GAYE, J. u. WALTHER, F.: Die Wanderung der Sandriffe vor den ostfriesischen Inseln. *Bautechnik* 13, 41, S. 555—567, 1935.
23. GESSNER, H.: Die Schlammanalyse. *Akad. Verlagsges. Leipzig* 1931.
24. GILBERT, G. K.: The transportation of debris by running water. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 86, 1914.
25. GLANGEAUD: Feststofftransport und -ablagerung in den Tidemündungen. Beispiel der Gironde, mitgeteilt von Glangeaud. Auszugsweise Übersetzung aus *Révue Générale de l'Hydraulique* 30, 1939.
26. GRIPP, K.: Entstehung und künftige Entwicklung der Deutschen Bucht. *Arch. Dtsch. Seewarte* 63, 2, 1944.
27. GRY, H.: Das Wattenmeer bei Skallingen. Physiographisch-biologische Untersuchung eines dänischen Tidegebietes. No. 1. Quantitative Untersuchungen über den Sinkstofftransport durch Gezeitenströmungen. *Fol. Geogr. Danica*, Tom. 2, No 1. Verlag H. Hagerups, Kopenhagen 1942.
28. HARTNACK, W.: Über Sandriffe. *Jahrb. Pomm. Geogr. Ges.* 40—42, Greifswald 1924.
29. HENSEN, W.: Die Entwicklung der Fahrwasserverhältnisse in der Außen-Elbe. *Jahrb. Hafenbau-techn. Ges.* 18, S. 91—165, 1939/40.
30. HENSEN, W.: Modellversuche für den Amerika-Hafen in Cuxhaven. *Mitt. Hann. Versuchsanst. H.* 4, 1953.
31. HERRMANN, F.: Über den physikalischen und chemischen Aufbau von Marschböden und Watten verschiedenen Alters. *Westküste*, S. 72—119, Kriegeheft 1943.
32. HEYWOOD, H.: Measurement of the fineness of powdered materials. *Inst. Mech. Engin. (London) Proc.* vol. 140, S. 257—347, 1938.
33. HIBBEN, I. A.: Die Schutzbauten auf der Insel Borkum. *Diss. Breslau* 1935 u. *Die Bautechnik*, 4. verstärktes Vierteljahresh., 1935.
34. HOLLE, Ch. G.: Sedimentation at the mouth of the Mississippi river. *Proc. 2. Conf. on Coastal Engineering*, Bd. 2. Council on Wave Research. Berkeley 1952.
35. HURST, H. E.: The suspension of sand in water. *Roy. Soc. London Proc.* vol. 124, S. 196—201, 1929.
36. HUSTEDT, F.: Die Diatomeenflora des Küstengebietes der Nordsee vom Dollart bis zur Elbemündung. *Abh. Nat. Ver. Bremen* 31, 3, 1939.

37. IWERSEN, J.: Stellungnahme zum Deichbau und Versuchskoog im Wattgebiet von Klanxbüll. Unveröff. Bericht, Husum 1936.
38. IWERSEN, J. und WOHLBERG, E.: Versuchskoog am Hindenburgdamm. Unveröff. Bericht, Husum 1937.
39. IWERSEN, J.: Zur bodenkundlichen Kartierung des nordfriesischen Wattengebietes. Westküste, S. 47 bis 71, Kriegsheft 1943.
40. IWERSEN, J.: Das Problem der Kultivierung eingedeichter Watten. Die Küste 2, 1, S. 24—142, 1953.
41. JÜRGENSONS-STRAUMANIS: Kurzes Lehrbuch der Kolloidchemie, Berlin 1949.
42. KALINSKE, A. A.: Experimental studies in liquid turbulence. Univ. Studies in Engineering. Bull. 20, S. 50—65, Iowa 1940.
43. KAMPS, L. F.: Enige gegevens over de sedimentatie in het Waddengebied ten Noorden van de Provincie Groningen. Waddensymposium, 's-Gravenhage 1950.
44. KELLEY, W. P.: Base-exchange in relation to sediment. In Trask: Recent marine-sediment; a Symposium. London, T. Murby u. Co. 1939.
45. KELLEY, W. P. und LIEBIG, G. F.: Base-exchange in relation to composition of clay with special reference of seawater. Bull. Am. Assoc. Petr. Geol. 18, 1934.
46. KEULEGAN, G.: An experimental study of submarine sand-bars. Beach Erosion Board, Chief of Engineers, Technical Report No. 3, 1948.
47. KÖNIG, D.: Vergleichende Bestandsaufnahme an bodenbewohnenden Watt-Tieren im Gebiet des Sicherungsdammes vor dem Friedrichskoog (Süderdithmarschen) in den Jahren 1935—1939. Westküste, S. 120—172, Kriegsheft 1943.
48. KÖPPEN, R.: Zur Klärung der Vorgänge bei der Sinkstoffausflockung im Brackwasser. Unveröff. Bericht Wasser- u. Schiffsamt Emden 1950.
49. KÖPPEN, R.: Bestimmung der mineralogenen und organogenen Kieselsäurebestandteile des Schlicks. Unveröff. Bericht Wasser- u. Schiffsamt Emden 1950.
50. KÖPPEN, R.: Der Schlick im Küstengebiet der Nordsee. Die Umschau in Wissenschaft und Technik 51, 13; S. 389/390, 1951.
51. KOLUMBE, E.: Die Bedeutung der Pflanzen für die Landgewinnung an der schleswig-holsteinischen Westküste. Die Heimat 42, 1932.
52. KORTÜM, G.: Lehrbuch der Elektrochemie, S. 348 ff., Berlin 1950.
53. KREY, H. D.: Die Bewegung der Schwemmstoffe in unseren Flüssen. Zentralbl. d. Bauverw. 1919 und 1921.
54. KRÜGER, W.: Sinkstoffuntersuchungen im Jadebusen. Unveröff. Bericht, Wilhelmshaven 1911.
55. KRÜGER, W.: Die Jade, das Fahrwasser Wilhelmshavens, ihre Entstehung und ihr Zustand. Jahrb. Hafenbautechn. Ges. 4, Hamburg 1921.
56. KRÜGER, W.: Riffwanderung vor Wangerooge. Abh. Naturw. Ver. Bremen 30, 1/2, 1937.
57. KUMM, A.: Über Sedimentbildung an der Küste des norddeutschen Wattenmeeres. Ver. Naturw. 20, S. 38—55, Braunschweig 1927.
58. LABAYE, G.: Note sur le débit solide des cours d'eau. La Houille Blanche, Numéro spécial „A“, S. 600—627, 1948.
- 58a. LACEY, G.: Uniform flow in alluvial rivers and canals. Inst. Civ. Engineering, Minutes of Proc. vol. 237, S. 241—454, 1933.
- 58b. LACEY, G.: A general theory of flows in alluvium. Inst. Civ. Engineering, Jour. vol. 27. Nr. 1. S. 16—47, 1946.
59. LANE, E. W. u. KALINSKE, A. A.: Engineering calculation of suspended sediment. Amer. Geophys. Union, Trans. 22, 3, S. 603—606, 1941.
60. LINKE, O.: Die Einwirkung des Quellers (*Salicornia herbacea* L.) auf den Verlandungsvorgang des Wattes im Jadebusen. Abb. Naturw. Ver. Bremen 30, 1/2, 1937.
61. LINKE, O.: Bericht über die Riff- und Sandwanderungs-Untersuchungen am Nordstrand von Norderney. Unveröff. Forschungsber. Forschungsstelle Norderney, 1952.
62. LUCHT, F.: Hydrographische Messungen in der Außenelbe. Wasserwirtschaft, Sonderheft S. 22—26, 1951.
63. LUCHT, F.: Hydrographische Untersuchungen in der Brackwasserzone an der Elbe. Dtsch. Hydrogr. Zeitschr. 6, S. 18—32, 1953.
64. LUCHT, F.: Geschiebe und Sinkstofftransport in der Elbe. Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg 23, S. 68—75, 1954.
65. LÜDERS, K.: Entstehung der Gezeiteinschichtung auf den Watten im Jadebusen. Sendenberghiana 12, 4/5, S. 229—254, 1930.

66. LÜDERS, K.: Sediment und Strömung. *Senckenbergiana* 12, 6, S. 387—390, 1932.
67. LÜDERS, K.: Unmittelbare Sandwanderungsmessung auf dem Meeresboden. Veröff. Inst. Meereskunde N.F.A. 24, 1933.
68. LÜDERS, K.: Über das Wandern der Priele. *Abh. Nat. Ver. Bremen* 29, 1/2, 1934.
69. LÜDERS, K.: Die Messung der Sandwanderung in der Flachsee mit Gezeiten. *Senckenbergiana* 18, 3/4, S. 121—130, 1936.
70. LÜNEBURG, H.: Hydrochemische Untersuchungen in der Elbmündung mittels Elektrokolorimeter. *Arch. Dtsch. Seewarte* 59, 5, 1939.
71. LÜNEBURG, H.: Beiträge zur Hydrographie der Wesermündung. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 1, S. 91—114, 1952.
72. LÜNEBURG, H.: Über Messung und Bedeutung der Sinkstoffe in Elb- und Wesermündung. *Vom Wasser* 18, Weinheim 1950/51.
73. LÜNEBURG, H.: Ein Gerät zur Messung des Schlickfalls in Küstengewässern und Häfen. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 1, 2, S. 129—138, 1952.
- 73a. LÜNEBURG, H.: Die Probleme der Sinkstoffverteilung in der Wesermündung. Veröff. Inst. Meeresforsch. Bremerhaven 2, S. 15—51, 1953.
- 73b. LÜNEBURG, H.: Beiträge zur Hydrographie der Wesermündung III. Vergleichende Wattuntersuchungen im Bereich der Wesermündung. Veröff. Inst. Meeresforschung Bremerhaven 3, S. 66 bis 125, 1954.
74. LÜTTMER, J. H.: Zur Schlickbildung im Mündungsgebiet der Ems. *Kolloid-Zeitschr.* 118, S. 1—78, 1950.
75. MASCHHAUPT, J. G.: Het koolzure-kalkgehalte der Dollardgronden. *Waddensymposium*. 's-Gravenhage 1951.
- 75a. MATTHES, G. H.: Solids in stream flow. *Amer. Geophys. Union Trans.* 30, 3, S. 421—426, 1949.
76. NELSON, M. E. u. BENEDICT, P. C.: Measurement and analysis of sediment load on streams. *Amer. Soc. Civil Engin. Proc.* 76, Separate 31, 1950.
77. O'BRIEN, M. P.: Review of the theory of turbulent flow and its relation to sediment-transportation. *Amer. Geophys. Union Trans.* 14, S. 487—491, 1933.
78. OEXLE, L.: Änderung der Auflandung im Stausee des Saalackkraftwerkes bei Reichenhall in den Jahren 1928—1933. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, H. 18/19, 1935.
79. OEXLE, L.: Die Schwebestoff- und Schlammführung der geschiebeführenden Flüsse Bayerns. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, H. 11, 1936.
80. OSTENDORFF, E.: Die Grund- und Bodenverhältnisse der Watten zwischen Sylt und Eiderstedt. *Westküste, Kriegsheft* 1943.
81. OTTO, Th.: Der Darss und Zingst. *Jahresber. Geogr. Ges. Greifswald* 13, 1911/12.
82. o. V.: Vom Rheindelta in der Fussacher Bucht. *Schweiz. Bauzeitung* 110, S. 164, 1937.
83. PETERSEN, M.: Sinkstoffgruppenmessung in der Norder Hever 1937. Unveröff. Arbeitsber. Marschenbauamt — Forschungsabt. — Husum 6. 11. 1941.
84. PETERSEN, M.: Abbruch und Schutz der Steilufer an der Ostseeküste (Samland bis Schleswig-Holstein). *Die Küste* 1, 2, S. 100—152, 1952.
85. PLATH, M.: Die biologische Bestandsaufnahme als Verfahren zur Kennzeichnung der Wattsedimente und die Kartierung der nordfriesischen Watten. *Westküste, Kriegsheft*, 1943.
86. PRATJE, O.: Die Sedimente der Deutschen Bucht. *Wissenschaftl. Meeresunters. Abt. Helgoland*, N.F. 18, 6, 1931.
87. PRATJE, O.: Der Verbleib des Abbruchmaterials der Samlandküste. *Schrift. Phys.-ökon. Ges. Königsberg* 67, 3/4, 1932.
88. PRATJE, O.: Die Lebensbezirke der Foraminiferen am Boden der Deutschen Bucht. *Aus der Heimat*. 46, 2, S. 41—46, 1933.
89. PRATJE, O.: Die Schlickgebiete der Deutschen Bucht und die Beziehungen zwischen Strömung und Sediment. *Geol. Rundschau* 25, 3, S. 145—160, 1934.
90. PRATJE, O.: Die Sedimentation in der südlichen Ostsee. *Ann. Hydr.*, S. 92—97, 1939.
- 90a. PRATJE, O.: Die Bodenbedeckung der südlichen und mittleren Ostsee. *Dtsch. Hydrogr. Zeitschr.* 1, 2/3, S. 45—61, 1948.
91. PRATJE, O.: Der Meeresboden als Lebensgrundlage. *Fischereiwelt, Reiheft* 1, 1949.
92. RIVIÈRE, A.: Beobachtungen über die Sedimentation an der Küste der Vendée. Die Sedimentation an der Küste und in den Flußmündungen, sowie ihre allgemeinen Gesetze. Auszugsw. Übers. aus: *Revue Générale de l'Hydraulique*, Nov.—Dez. 1948.

93. RIVIÈRE, A. u. VERNHET, S.: Sedimentation of clayish minerals in a marine medium in the presence of humic matter. 1951.
94. RINSUM, A. van: Die Schwebstoffe der bayerischen Flüsse. Festschr. z. 50jähr. Bestehen der Bayerischen Landesstelle f. Gewässerkunde, 1898—1948. R. Oldenburg, München 1950.
95. ROUSE, H.: Experiments on the mechanics of sediment suspension. Proc. 5. Intern. Kongr. f. angew. Mechanik. 1939.
96. ROUSE, H.: An analysis of sediment transportation in the light of fluid-turbulence. U.S. Department of Agriculture Soil Conservation Service, Sedimentation Division 1939.
97. RUCK, K. W.: Seegrundkartierung der Lübecker Bucht. Die Küste 1, 2, S. 55—57, 1952.
98. SANTEMA, P.: Koagulation von Flußschlamm beim Zusammentreffen mit Seewasser. Übers. aus „De Ingenieur“ 65, 16, S. B 70—B 72, 1953.
99. SCHAANK, E. M. H.: Transport de sable par le courant dans la partie supérieure des embranchements Néerlandais du Rhin. Intern. Vereinig. wissenschaftl. Hydrologie. Bull. 22. 60. Hauptvers. Edinbourg 1936.
100. SCHULZ, H.: Die Wasseruntersuchungskammer in der Lauenburger Elbbrücke. Mitt. Wasser- u. Schifffahrtsdirektion Hamburg 1951.
101. SCHULZ, H.: Messungen von Temperatur, Dichte und Salzgehalt des Meerwassers. Die Wasserwirtschaft 41, 11, S. 400—404, 1951.
102. SCHULZ, H.: Probleme der gewässerkundlichen Meßtechnik. Mitt. Hannov. Versuchsanst. 2, 1952.
103. SCHWARZ, A.: Der tierische Einfluß auf die Meeressedimente. Senckenbergiana 14, Frankfurt/M. 1932.
104. SEIFERT, R.: Über die Geschiebeführung von Wasserläufen mit beweglicher Sohle. Dtsch. Ber. Intern. Vereinig. wissenschaftl. Hydrologie, Washington 1939.
105. SHEPARD, F. P.: Longshore-bars and longshore-troughs. Techn. Memorandum 15, Beach Erosion Board. Chief of Engineers, 1950.
106. SIMON, W. G.: Untersuchungsergebnisse an Grundproben aus dem Gebiet der Außen-Elbe und ihre Ausdeutung hinsichtlich der Sandwanderung. 1949/50. Mitt. Wasser- u. Schifffahrtsdirektion Hamburg u. Geol. Landesamt Hamburg 1, 1952.
107. SIMON, W. G.: Über das Vorkommen einer Schale von *Tapes senescens* Cocconi aus dem Eem im rezenten Schill der Elbmündung. Probleme der Küstenforschung im südl. Nordseegebiet 5, 1953.
108. STEVENS, I. C.: The silt-problem. Amer. Soc. Civil Engineers, Transact. 101, S. 207—288, 1934.
- 108a. THAMDRUP, H. M.: Beiträge zur Ökologie der Wattenfauna. Medd. Danmarks Fiskeri og Havunders, 10, 2, 1935.
109. THIJSSE, J. Th.: Veranderingen in waterbewegingen en bodemrelief in de waddenzee. Wadden-symposium, 's-Gravenhage 1951.
110. TIEDEMANN, B.: Über Wandern des Sandes im Küstensaum des Samlandes. Mitt. Preuß. Versuchsanst. Wasserbau und Schiffbau Berlin, 5, 1930.
111. TRUSHEIM, F.: Zur Bildungsgeschwindigkeit geschichteter Sedimente im Wattenmeer, besonders solcher mit schräger Parallelschichtung. Senckenbergiana 11, S. 47, Frankfurt/M. 1929.
112. TWENHOFEL, W. H.: Treatise on sedimentation Bailliere, Tindall and Cox, London 1932.
113. TWENHOFEL, W. H.: Principles of sedimentation, McGraw Hill. New York 1939.
114. U.S. INTERDEPARTMENTAL COMMITTEE: A study of methods used in measurement and analysis of sediment loads in streams. St. Paul Engineer District Sub-Office, Hydraulic-Laboratory, University of Iowa, Iowa-City. — Reports:
 - No. 1. Field practice and equipment used in sampling suspended sediment. 1940.
 - No. 2. Equipment used for sampling bed-load and bed-material. 1940.
 - No. 3. Analytical study of methods of sampling suspended sediment. 1941.
 - No. 4. Methods of analyzing sediment samples. 1941.
 - No. 5. Laboratory investigation of suspended sediment samplers. 1941.
 - No. 6. The design of improved types of suspended sediment samplers (nicht erhältlich).
 - No. 7. A study of new methods for size-analysis of suspended sediment samples. 1943.
 - No. 8. Measurement of the sediment discharge of streams. 1948.
 - No. 9. Density of sediments deposited in reservoirs. 1943
115. VANONI, V. A.: Some experiments on the transportation of suspended load. Amer. Geophys. Union, Trans. 22, 3, S. 608—620, 1941.
116. VEEN, J. van: Zandtransport langs onze kusten. Nederl. Nat. u. Gen. Congr. 1935.
117. VEEN, J. van: Onderzoekingen in de Hoofden. 's-Gravenhage 1936.
118. VEEN, J. van: Die unterseeische Sandwüste in der Nordsee. Geol. Meere u. Binnengew. 1938.

119. VEEN, J. van: Eb- en vloodschaar-systemen in de Nederlandse getijwateren. Waddensymposium. 's-Gravenhage 1951.
120. VELIKANOV, M. A.: Die Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie auf die Ablagerung von Sand in turbulenten Strömungen. Veröff. hydrotechn. Versuchsanst. Leningrad, 18, 1936.
121. VERNON-HARCOURT, L. F.: Experimental investigations on the action of seawater in accelerating the deposit of riversilt and the formation of delta's. Proc. Inst. Civ. Engrs. V, CXLII, paper 3196, 1900.
122. VICK, F.: Über die Erfassung des Sinkstofftransportes in Tideflüssen. Die Wasserwirtschaft 43, 1, S. 10—13, 1952.
- 122a. WALTHER, F.: Die Gezeiten und Meeresströmungen im Norderneyer Seegat. Diss. Berlin 1934.
123. WEINNOLDT, E. und BAHR, M.: Die Versandung der Eider. Ursachen und Gegenmaßnahmen. Wasserwirtschaft 42, 8, S. 255—266, 1952.
124. WIRTZ, D.: Die Beziehungen zwischen submariner Abtragung und Sandwanderung an der Küste Pommerns. Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg H. 18, S. 45—72, 1949.
125. WOHLBERG, E.: Die grüne Insel in der Eidermündung, eine entwicklungsphysiologische Untersuchung. Arch. Deutsche Seewarte 50, 2, 1931.
126. WOHLBERG, E.: Über die tatsächliche Leistung von *Salicornia herbacea* L. im Haushalt der Watten. Wiss. Meeresunters. Abt. Helgoland 19, 3, 1933.
127. WOHLBERG, E.: Biologische Landgewinnungsarbeiten im Wattenmeer. Der Biologe 1934.
128. WOHLBERG, E.: Zusammenstellung einiger Punkte zur Begründung der Frühbedeichung des Verlandungsgebietes am Hindenburgdamm. Unveröff. Bericht, Husum Dezember 1936.
129. WOHLBERG, E.: Die Wattenmeer-Lebensgemeinschaften im Königshafen von Sylt. Helgol. wiss. Meeresunters. 1, 1, 1937.
130. WOHLBERG, E.: Bericht über die Anlandungen nördlich und südlich des Hindenburgdamms nach den Herbst- und Winterfluten 1936/37. Unveröff. Bericht, Husum Juli 1937.
131. WOHLBERG, E.: Biologische Kulturmaßnahmen mit dem Queller (*Salicornia herbacea* L.) zur Landgewinnung im Wattenmeer. Westküste 1, 2, S. 52—104, 1938.
132. WOHLBERG, E.: Die Nutzenanwendung biologischer Erkenntnisse im Wattenmeer zugunsten der praktischen Landgewinnung an der deutschen Nordseeküste. Rapp. et Procès-Verbaux, CIV, 1939.
133. WOHLBERG, E.: Der horizontale Wassers schöpfer. Dtsch. Hydrogr. Zeitschr. 3, 5/6, 1950.
134. WOHLBERG, E.: Produktionsbiologische Untersuchungen auf eingedeichten Watten. Die Küste 2, 1, 1953.
135. WOHLBERG, E.: Der Anwachs am Hindenburgdamm. Unveröff. Bericht, Husum Dezember 1952.
136. WOHLBERG, E.: Sinkstoff, Sediment und Anwachs am Hindenburgdamm. Die Küste 2, 2, S. 33 bis 94, 1954.